



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 : 2023-2024

N° D'ORDRE

113

CANDIDAT

Nom : **OUEDE**

Prénoms : **Gla Blaise**

THESE

Pour l'obtention du grade de Docteur de
l'Université Jean LOROUGNON GUEDE

Mention : Géoscience et environnement

Spécialité : Hydrologie et Agro-climatologie

**Évaluation spatio-temporelle des ressources en
eau du bassin versant du Haut Bandama pour
l'optimisation de la production de la canne à
sucre : cas des complexes sucriers de
Ferkessédougou (Nord de la Côte d'Ivoire)**

JURY

Présidente : Mme. **TRAORE Karidia Epouse Ouattara**, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE de Daloa

Co-directeur : M. **KOUASSI Kouakou Lazare**, Professeur Titulaire, Université
Jean LOROUGNON GUEDE de Daloa

Co-directeur : M. **ARONA Diédihou**, Directeur de recherche, Institut de Recherche
et de Développement (IRD), Cocody, Abidjan

Rapporteur : M. **KOUA Tanoh Jean-Jacques**, Maître de Conférences, Université
Jean LOROUGNON GUEDE de Daloa

Examineur : M. **KOUASSI Amani Michel**, Professeur Titulaire, Institut National
Polytechnique Félix HOUPHOUËT-BOIGNY

Examineur : M. **YOROBA Fidèle**, Maître de Conférences, Université Félix
HOUPHOUËT-BOIGNY de Bouaké

Soutenue publiquement

le : 30 Novembre 2024



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE : 2023-2024

N° D'ORDRE

113

CANDIDAT

Nom : **OUEDE**

Prénoms : **Gla Blaise**

Soutenue publiquement

le : **30 Novembre 2024**

THESE

Pour l'obtention du grade de Docteur de
l'Université Jean LOROUGNON GUEDE

Mention : Géoscience et environnement

Spécialité : Hydrologie et Agro-climatologie

**Évaluation spatio-temporelle des ressources
en eau du bassin versant du Haut Bandama
pour l'optimisation de la production de la
canne à sucre : cas des complexes sucriers de
Ferkessédougou (Nord de la Côte d'Ivoire)**

JURY

Présidente : Mme. **TRAORE Karidia Epouse Ouattara**, Professeur Titulaire,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Co-directeur : M. **KOUASSI Kouakou Lazare**, Professeur Titulaire, Université Jean
LOROUGNON GUEDE

Co-directeur : M. **ARONA Diédihou**, Directeur de recherche, Institut de Recherche
et de Développement (IRD), Cocody, Abidjan

Rapporteur : M. **KOUA Tanoh Jean-Jacques**, Maître de Conférences, Université
Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. **KOUASSI Amani Michel**, Professeur Titulaire, Institut National
Polytechnique Félix HOUPHOUËT-BOIGNY

Examineur : M. **YOROBA Fidèle**, Maître de Conférences, Université Félix
HOUPHOUËT-BOIGNY

TABLE DES MATIERES	Page
TABLE DES MATIERES	i
REMERCIEMENTS.....	vii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES ANNEXES	xvi
INTRODUCTION	1
PARTIE I : GÉNÉRALITÉS	5
CHAPITRE 1 : CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET SOCIO-ÉCONOMIQUES DU BASSIN VERSANT DU HAUT BANDAMA A ROUTE KORHOGO BADIKAHA.....	6
1.1. Situation géographique.....	6
1.2. Hydrographie.....	7
1.3. Géomorphologie.....	7
1.4. Hydrogéologie	8
1.5. Sols du bassin versant du Haut Bandama Badikaha.....	9
1.6. Géologie	9
1.7. Climat	10
1.8. Vent	10
1.9. Végétation	10
1.10. Aspects socio-économiques	11
Conclusion partielle	11
CHAPITRE 2 : CONCEPTS DE BASES ET ÉTAT DE L'ART	12
2.1. Connaissances sur la variabilité et le changement climatique	12
2.1.1. Climatologie	12
2.1.2. Agro-climatologie	12
2.1.3. Variabilité climatique	13
2.1.4. Changement climatique.....	14
2.1.5. Modélisation climatique.....	17
2.2. Utilisation de la télédétection et du SIG pour la modélisation de l'évolution de l'occupation des sols et leur apport dans la gestion des ressources en eau.....	22
2.2.1. Classification de l'occupation des sols.....	23
2.2.2. Modèle de prédiction de l'occupation des sols	24
2.2.3. Apport des SIG dans la gestion des ressources en eau.....	26

2.3. Modélisation hydrologique et hydraulique	27
2.3.1. Classification des différents types de modèles hydrologiques	27
2.3.2. Modélisation des écoulements à surface libre et de la propagation des crues	33
2.4. Cycle végétatif de la canne à sucre	38
2.5. Climat écologique de la canne à sucre	39
Conclusion partielle	40
PARTIE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES	41
CHAPITRE 3 : MATÉRIEL	46
3.1. Données	46
3.1.1. Données climatiques	46
3.1.2. Données d'images satellitaires	47
3.1.3. Données pédologiques	47
3.1.4. Données agronomiques	47
3.1.5. Données hydrologiques	48
3.2. Matériel de terrain	48
3.3. Matériel de laboratoire	48
3.4. Logiciels de traitement des données	48
Conclusion partielle	49
CHAPITRE 4 : MÉTHODES	50
4.1. Caractérisation du changement climatique sur la période 2021-2050	50
4.1.1. Détermination de la sécheresse pluviométrique passé et future	50
4.1.2. Détermination de la sécheresse hydrologique	51
4.1.3. Détermination de l'influence de la sécheresse pluviométrique sur l'hydrologie ..	52
4.1.4. Caractérisation de l'occurrence de sécheresse : contribution des chaînes de Markov	52
4.1.5. Redéfinition de la saison agricole pour la canne à sucre pluviale dans les complexes sucriers de Ferkessedougou	54
4.1.6. Caractérisation des extrêmes climatiques	55
4.1.7. Détermination de l'influence de la variation des extrêmes climatiques sur la production de la canne à sucre pluviale	57
4.1.8. Évaluation du changement climatique dans le bassin versant du Haut Bandama à Route Korhogo-Badikaha sur la période 2021-2050	58
4.2. Evaluation de la dynamique de l'occupation des sols sur la période 2021-2050	62
4.2.1. Traitement numérique des images satellitaires	62

4.2.2.	Traitement statistique des changements d'occupation des sols	66
4.2.3.	Prédiction de l'occupation des sols (années 2035 et 2050).....	67
4.2.4.	Évaluation de l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur le coefficient de ruissellement.....	71
4.3.	Simulation de l'évolution des ressources en eau sur la période 2021-2050.....	72
4.3.1.	Choix du modèle hydrologique	72
4.3.2.	Mise en place du modèle SWAT sur le bassin versant du Haut Bandama	73
4.3.3.	Simulation du fonctionnement hydrologique sur la période 2021-2050.....	87
4.4.	Analyse de l'adéquation disponibilité-besoins en eau des complexes sucriers de Ferkessédougou sur la période 2021-2050.....	91
4.4.1.	Évaluation de la capacité des retenues d'eau (Morrison et Lokpoho).....	91
4.4.2.	Disponibilité de la ressource en eau dans les réservoirs Lokpoho et Morrison...	93
4.4.3.	Besoins en eau sur les retenues d'eau de Morrison et Lokpoho sur la période 2021-2050.....	94
4.4.4.	Évaluation de l'adéquation disponibilité-besoins en eau	94
4.5.	Conclusion partielle.....	95
PARTIE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION		97
CHAPITRE 5 : CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT BANDAMA À ROUTE KORHOGO-BADIKAHA.....		94
5.1.	Variabilité hydro-climatique sur la période 1986-2016	94
5.1.1.	Analyse de la sécheresse pluviométrique.....	94
5.1.2.	Analyse de la sécheresse hydrologique	96
5.1.3.	Influence de la sècheresse pluviométrique sur les débits sur la période 1986- 2016.....	96
5.1.4.	Analyse des débits d'étiage	97
5.1.5.	Occurrence des sècheresses annuelles de 1986 à 2016	98
5.1.6.	Variabilité spatiale de la sécheresse	99
5.1.7.	Période de retour de la sécheresse.....	101
5.1.8.	Redéfinition de la saison agricole dans les complexes sucriers de Ferké	102
5.2.	Caractérisation des indices extrêmes de changement climatique.....	103
5.2.1.	Tendance des indices de précipitations sur la période 1986-2016.....	103
5.2.2.	Tendances des indices de température sur la période 1986-2016.....	111
5.2.3.	Étude statistique de la corrélation entre les conditions climatiques extrêmes et le rendement de la canne à sucre pluviale	114

5.3. Étude du changement climatique dans le bassin versant du Haut Bandama sur la période 2021-2050.....	117
5.3.1. Choix des modèles climatiques régionaux	117
5.3.2. Mise en évidence des biais des précipitations brutes simulées	118
5.3.3. Mise en évidence des biais de températures.....	123
5.3.4. Analyse des données climatiques corrigées sur la période de référence.....	125
5.3.5. Analyse des paramètres climatiques sur la période 2021-2050	130
5.3.6. Variations des pluies et des températures sur la période 2021-2050	135
5.4. Variabilité climatique sur la période 2021-2050.....	142
5.4.1. Sécheresse pluviométrique sur la période 2021-2050 selon les modèles CanESM2	142
5.4.2. Occurrence des sécheresses annuelles sur la période 2021-2050	146
5.4.3. Détermination de la saison agricole de la canne à sucre dans les complexes sucriers de Ferkessédougou sur la période 2021-2050.....	152
5.5. Discussion	156
Conclusion partielle	158
CHAPITRE 6 : DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS SUR LA PÉRIODE 2021-2050	159
6.1. Validation des résultats de la classification de l'utilisation des sols	159
6.2. Analyse de la dynamique de l'occupation des sols	162
6.2.1. Analyse diachronique de l'évolution de l'occupation des sols	162
6.2.2. Bilan de l'évolution de l'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama sur la période 1990-2020.....	164
6.3. Prédiction de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama.....	165
6.3.1. Analyse du changement de l'occupation des sols	165
6.3.2. Validation du modèle Land Change Modeler et simulation de l'occupation des sols de 2020.....	172
6.3.3. Génération des scénarios de l'occupation des sols.....	175
6.3.4. Analyse diachronique de l'occupation des sols du bassin versant	177
6.4. Impact de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols sur le coefficient de ruissellement.....	178
6.5. Discussion	179
Conclusion partielle	181

CHAPITRE 7 : ÉVOLUTION DES RESSOURCES EN EAU SUR LA PÉRIODE 2021-2050 182

7.1. Limite du bassin, sous bassin et répartition des unités de réponse hydrologique	182
7.2. Résultats de l'analyse de sensibilité et de calibration du modèle SWAT	183
7.3. Résultats de la validation du modèle SWAT	185
7.4. Évaluation quantitative des ressources en eau dans les complexes sucriers de Ferkessédougou sur la période 1986-1990.....	186
7.4.1. Évolution temporelle des ressources en eau sur la période 1986-2016.....	186
7.4.2. Évolution spatiale des ressources en eau sur la période 1986-2016	189
7.4.3. Évaluation de la capacité des retenues de Lokpoho et Morrison.....	193
7.4.4. Bilan hydrologique sur la période 1986-2016.....	195
7.4.5. Impact combiné des changements climatiques et de la dynamique d'occupation des sols sur les écoulements	196
7.5. Analyse de la propagation des crues du fleuve Bandama dans les complexes sucriers de Ferkessédougou	211
7.5.1. Calage du modèle hydraulique HEC-CRAS	211
7.5.2. Validation du modèle hydraulique HEC-CRAS	211
7.5.3. Modélisation des inondations provoquées par des pluies extrêmes	212
7.5.4. Modélisation à différentes périodes de retour des crues du fleuve Bandama dans les complexes sucriers de Ferkessédougou	215
7.5.5. Dynamique des écoulements à différentes périodes de retour dans les périmètres sucriers de Ferkessédougou.....	217
7.6. Discussion	222
Conclusion partielle	225

CHAPITRE 8 : ADEQUATION DISPONIBILITE-BESOIN EN EAU DANS LES COMPLEXES SUCRIERS DE FERKESSEDOUGOU

8.1. Analyse de la disponibilité en eau des retenues de Morrison et Lokpoho	227
8.1.1. Analyse de la morphologie de la retenue d'eau de Morrison.....	227
8.1.2. Analyse des courbes hauteur-surface et hauteur-volume du barrage Morrison. 227	
8.1.3. Analyse de la morphologie de la retenue d'eau de Lopkoho	228
8.1.4. Analyse des courbes hauteur-volume et hauteur-surface du barrage Lokpoho... 229	
8.1.5. Synthèse des caractéristiques des retenues.....	230
8.2. Analyse des besoins en eau dans les complexes sucriers de Ferkessédougou	231

8.3. Analyse de l'adéquation disponibilité-besoins en eau sur la période 1986-2016 dans le complexe sucrier de Ferkessédougou	232
8.4. Analyse de l'adéquation disponibilité-besoins en eau sur la période 2021-2050 dans le complexe sucrier de Ferkessédougou	233
8.4.1. Détermination des besoins en eau sur la période 2021-2050	233
8.4.2. Rapport disponibilité-besoins en eau sur la période 2021-2050 sur la retenue d'eau de Lokpoho	235
8.4.3. Rapport disponibilité-besoins en eau sur la période 2021-2050 sur la retenue d'eau de Morrison	236
8.5. Analyse de la disponibilité-besoin en eau des retenues de Morrison et Lokpoho en cas de draguage des retenues Lokpoho et Morrison (période 2021-2050)	237
8.6. Discussion	238
Conclusion partielle	239
CONCLUSION	240
RÉFÉRENCES	248
ANNEXES	271
PUBLICATIONS	19
RÉSUMÉ	xix

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous voudrions tout d'abord remercier Dieu, car par sa grâce, cette thèse est arrivée jusqu'à son terme.

Nous remercions les autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, avec à leur tête Professeur ADOHI KROU Viviane, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour leur dévouement dans la formation des étudiants.

Nous avons été très honorés d'apprendre aux côtés de deux personnes spéciales, Professeur KOUASSI Kouakou Lazare et Professeur ARONA Diedhiou, nos directeurs de thèse, respectivement Professeur titulaire à l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa et Directeur de recherche à l'Institut de Recherche et de Développement (IRD). Nous tenons du fond du cœur à vous exprimer nos sincères remerciements et notre gratitude pour votre temps si précieux et les moyens accordés à la réalisation et au perfectionnement de ce présent travail.

Toutes notre reconnaissance et vifs remerciements aux structures sans lesquelles la réalisation technique de cette thèse n'aurait été possible. Nous remercions la Sucrierie d'Afrique Côte d'Ivoire (SUCAF-CI) et la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) pour avoir mis à notre disposition des données qui ont servi à la réalisation de ce document. Nous remercions l'Agence Française de Développement (AFD) et le Programme d'Appui Stratégique à la Recherche Scientifique (PASRES) pour le financement de cette étude.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à toute l'équipe du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) avec à leur tête Professeur DIBI Brou, pour avoir permis la réalisation de ce travail au sein dudit laboratoire.

Nous adressons nos sincères remerciements à Docteur KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences et Chef de département des sciences de la terre. Cher maître, vos conseils, vos directives et votre mine toujours joviale en toute circonstance nous ont donné espoir dans les moments de peine et encouragé à aller au-delà de nos aspirations.

Sincères remerciements à Professeur KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Professeur Titulaire, pour sa disponibilité, ses conseils et encouragement à l'endroit des doctorants du LSTE. Merci Docteur pour vos critiques et suggestions qui ont été très bénéfiques.

Remerciement spécial à Docteur KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences, qui en plus de dispenser son savoir, apportent une aide précieuse dans l'insertion professionnelle des étudiants de l'UJLoG.

Nous remercions également Docteur YAO Affoué Berthe Epouse TOURE, Maître de Conférences, pour son implication particulière dans la réalisation de ce travail. Infiniment merci

Docteur pour votre aide qui a permis la collecte des informations sur la zone d'étude et la réalisation de cette thèse.

Nos sincères remerciements aux Docteurs ANOH Kouao Armand et EBLIN Sampah Georges, Maître de Conférences, pour leur contribution dans la réalisation de ce travail.

Nous remercions sincèrement tous les enseignants de l'UFR Environnement, auprès desquels nous avons appris énormément. Plus particulièrement, Docteurs MANGOUA Oi Mangoua Jules, KOUAKOU Kouassi Hervé et SORO Taninan Drissa, tous Maîtres de Conférences pour leur disponibilité et conseils aux étudiants de l'UFR Environnement.

Nos remerciements vont également à l'endroit de Docteur KOUAME Yao Morton, Docteur BROU Loukou Alexis, Maître-Assistant pour l'attention particulière qu'ils accordent dans le suivi de mon parcours universitaire et leur apport dans la finalisation de ce mémoire.

Nous remercions tous les doctorants du Groupe de Recherche Eau-Climat-Environnement (GRECE) de l'Université Jean Lorougnon Guédé, à leur tête, Docteur TOURE Fanraban Fabrice, pour leur aide précieuse tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions les rapporteurs et les membres du jury qui ont accepté d'apporter leur contribution à l'amélioration de ce document.

Nous adressons nos chaleureuses reconnaissances à la famille OUEDE et la famille TAN, particulièrement Monsieur OUEDE Yoman Vincent, OUEDE Daniel, OUEDE Hilaire, OUEDE Tchiémoko et Monsieur TAN Lambert pour leurs soutiens et conseils tout au long de mes études.

Nous témoignons notre reconnaissance infinie et gratitude à Maman OUEDE Déto Pélagie Epouse TAN, pour sa présence quotidienne, matérielle et financière tout au long de notre vie.

Enfin, nous remercions toutes les personnes que nous n'avons pas pu citer ici, qui, de loin ou de près, ont contribué à la réalisation de ce travail.

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AEP	: Alimentation en Eau Potable
BVHBKB	: Bassin versant du Haut Bandama à Route-Korhogo-Badikaha
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CEDEAO	: Communauté Economique des Etats de l’Afrique de l’Ouest
CMIP	: Coupled Model Intercomparison Project
CPCSF	: Coopérative des Planteurs de Canne à Sucre de Ferkessédougou
ETP	: Evapotranspiration Potentielle
ETR	: Evapotranspiration réelle
GES	: Gaz à Effets de Serre
GIEC	: Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat
INS	: Institut National de la Statistique
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
LCM	: Land Change Modeler
MCG	: Modèles Climatiques Globaux
MCGAO	: Modèle du Climat Global Atmosphère-Océan
MCR	: Modèles Climatiques Régionaux
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
ONERC	: Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
PDSI	: Palmer Drought Severity Index
PIB	: Produit Intérieur Brut
RCP	: Representative Concentration Pathways
SIG	: Système d’Information Géographique
SODEXAM	: Société de Développement et d’Exploitation Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
SPEI	: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SPI	: Standardized Precipitation Index
SRES	: Special Report on Emissions Scenarios
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
SUCAF-CI	: Sucrerie d’Afrique-Côte d’Ivoire
SWAT	: Soil and Water Assessment Tool
UNESCO	: Organisation des Nations Unies pour la l’Education, la Science et la Culture
URH	: Unité de Réponse Hydrologique

LISTE DES TABLEAUX	Page
Tableau I : Données climatiques observées utilisées	46
Tableau II : Classification de la sécheresse suivant les valeurs des SPI.....	51
Tableau III : Classification des états de sécheresse hydrologique	52
Tableau IV : Indices de changement climatique retenus.....	56
Tableau V : Choix des classes d'occupation des sols.....	64
Tableau VI : Les entrées du modèle LCM pour la prédiction de l'occupation des sols	68
Tableau VII : Paramètres par couche de sol requis pour caractériser les sols dans SWAT	74
Tableau VIII : Unités d'occupation des sols intégrées dans le modèle SWAT	77
Tableau IX : Critères d'évaluation de la performance de SWAT	87
Tableau X : Récapitulatif de l'analyse de l'adéquation besoin-disponibilité en eau.....	95
Tableau XI : Comparaison des lois d'ajustement des débits d'étiage à la station route Korhogo-Badikaha	97
Tableau XII : Débits d'étiage pour diverses périodes de retour de débits à la station route Korhogo-Badikaha.	98
Tableau XIII : Probabilité de succession de deux (2) années sèches et/ou humides de 1986 à 2016.....	98
Tableau XIV : Probabilité de succession de trois (3) années sèches et/ou humides de 1986 à 2016.....	99
Tableau XV : Période de retour des séquences sèches	101
Tableau XVI : Valeurs propres et variances des différents axes G1, G2 et G3.	114
Tableau XVII : Corrélations entre le rendement de la canne à sucre pluviale et les indices climatiques extrêmes par la méthode de régression linéaire multiple	117
Tableau XVIII : Ecart relatif entre les hauteurs de pluies annuelles simulées et observées	121
Tableau XIX : Taux de variation des pluies sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP4.5	136
Tableau XX : Taux de variation des pluies sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5	137
Tableau XXI : Taux de variation des températures minimales (°C) sur la période 2021- 2050 selon le scénario RCP4.5	138
Tableau XXII : Taux de variation des températures minimales sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5	139

Tableau XXIII : Taux de variation des températures maximales sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP4.5	140
Tableau XXIV : Taux de variation des températures maximales sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5	141
Tableau XXV : Probabilité de succession des années sèches et humides par le processus de Markov d'ordre 1 sur la période 2021-2050	147
Tableau XXVI : Probabilités de succession des années sèches et humides par le processus de Markov d'ordre 2 sur la période 2021-2050.....	148
Tableau XXVII : Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 1990.....	159
Tableau XXVIII : Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 2006.....	160
Tableau XXIX : Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 2020.....	160
Tableau XXX : Précision globale des cartes de l'occupation des sols	160
Tableau XXXI : Changement de l'occupation des sols entre 1990-2006	163
Tableau XXXII : Changement de l'occupation des sols entre 2006-2020.....	163
Tableau XXXIII : Changement de l'occupation des sols de 1990 à 2020.....	164
Tableau XXXIV : Matrice des probabilités de transition de l'occupation des sols de 2006-2020	173
Tableau XXXV : Fiabilité de la carte de l'occupation des sols de 2020.....	173
Tableau XXXVI : Analyse des gains et pertes de l'occupation des sols de 2020 à 2050 .	177
Tableau XXXVII : Coefficients de ruissellement selon l'occupation des sols.....	178
Tableau XXXVIII : Proportion des sous bassins et des unités de réponses hydrologiques du bassin versant	182
Tableau XXXIX : Paramètres très sensibles	184
Tableau XL : Valeurs réajustées des paramètres très sensibles	184
Tableau XLI : Récapitulatif des sédiments entrants dans la retenue Lokpoho et Morrison sur la période 1986-2016	194
Tableau XLII : Comparaison statistique des lois d'ajustement des modules du fleuve Bandama à la station hydrométrique de Badikaha.....	216
Tableau XLIII : Comparaison statistique des lois d'ajustement des modules du fleuve Lokpoho à la station hydrométrique de Ferké-Sinématiali	216
Tableau XLIV : Débits pour différentes périodes de retour	217

Tableau XLV : Synthèse des cotes de références, surfaces et volumes d'eau stockée	231
Tableau XLVI : Demande en eau sur la retenue de Lopkoho	231
Tableau XLVII : Demande en eau sur la retenue de Morrisson	232
Tableau XLVIII : Rapport disponibilité-besoins en eau de la retenue de Lokpoho (1986-2016)	233
Tableau XLIX : Rapport disponibilité-besoins en eau de la retenue de Morrisson (1986-2016)	233
Tableau L : Besoins en eau sur la période 2021-2050 de la retenue d'eau de Lokpoho ...	234
Tableau LI : Besoins en eau sur la période 2021-2050 de la retenue d'eau de Morrison .	234
Tableau LII : Disponibilité-besoins en eau sur la retenue Lokpoho (période 2021-2050, RCP 4.5).....	235
Tableau LIII : Disponibilité-besoins en eau sur la retenue Lokpoho (période 2021-2050, RCP 8.5).....	235
Tableau LIV : Disponibilité-besoins en eau sur la retenue de Morrisson (période 2021-2050, RCP4.5).....	236
Tableau LV : Disponibilité-besoins en eau sur la retenue de Morrisson (période 2021-205, RCP8.5).....	236
Tableau LVI : Rapport disponibilité-besoins en eau de la retenue Lokpoho après draguage	237
Tableau LVII : Rapport disponibilité-besoins en eau de la retenue Morrisson après draguage	237

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant du Haut Bandama à Route Korhogo-Badikaha.....	6
Figure 2 : Carte du réseau hydrographique du BVHBKB	7
Figure 3 : Relief du bassin versant du Haut Bandama à Badikaha à Route Korhogo-Badikaha.....	8
Figure 4 : Carte géologique à l'échelle 1/200 000 du BVHBKB.....	9
Figure 5 : Diagramme ombrothermique de 1986-2016 à la station synoptique de Ferké 2 ...	10
Figure 6 : Changement global des températures et incertitudes.....	21
Figure 19 : Carte des complexes sucriers de Ferkessédougou le long du fleuve Bandama ...	34
Figure 8 : Détermination du bilan bioclimatique	55
Figure 9 : Comparaison entre les pluies moyennes mensuelles simulées et observées	59
Figure 10 : Organigramme de la méthode de classification supervisée	65
Figure 11 : Méthodologie de la cartographie de l'occupation des sols	71
Figure 12 : Fenêtre de délimitation du bassin versant, des sous-bassins versants et du réseau hydrographique.....	76
Figure 13 : Fenêtres permettant la définition des unités de réponses hydrologiques.....	78
Figure 14 : Fenêtre des permettant l'intégration données climatiques.....	79
Figure 15 : Fenêtre d'activation des tables d'entrée	79
Figure 16 : Fenêtre de lancement de la simulation.....	81
Figure 17 : Fenêtre de visualisation des résultats.....	81
Figure 18 : Onglet principal du module SUFI-2 de SWAT-CUP.....	84
Figure 7 : Compartiments hydrologiques du modèle SWAT.....	89
Figure 20 : Levés bathymétriques sur les plans d'eau	92
Figure 21 : Évolution mensuelle des indices de sécheresse pluviométrique dans les différentes stations sur la période 1986-2016.....	95
Figure 22 : Évolution des indices de sécheresse hydrologique à la station hydrométrique de route Korhogo-Badikaha de 1986 à 2016.....	96
Figure 23 : Influence de la sécheresse pluviométrique sur les débits sur la période 1986-2016.....	97
Figure 24 : Carte de la variabilité spatiale de deux années successives sèches sur la période 1986-2016.....	100

Figure 25 : Carte de la variabilité spatiale de trois années successives sèches sur la période 1986-2016.....	101
Figure 26 : Évolution des périodes de retour des séquences de sécheresses.....	102
Figure 27 : Identification de la saison agricole dans le complexe sucrier de Ferkessédougou (1986-2016).....	103
Figure 28 : Tendances des indices des totaux annuels de précipitations	104
Figure 29 : Évolution interannuelle des jours consécutifs humides.....	105
Figure 30 : Évolution interannuelle des jours consécutifs secs.....	106
Figure 31 : Évolution du maximum d'une journée de pluies	107
Figure 32 : Évolution du cumul maximal des précipitations de 5 jours.....	108
Figure 33 : Évolution interannuelle du nombre de jours très humides	109
Figure 34 : Évolution interannuelle des jours très humides	110
Figure 35 : Évolution des températures maximales et minimales annuelles.....	111
Figure 36 : Évolution interannuelle du nombre de jours froids et chauds	112
Figure 37 : Le pourcentage de nuits chaudes et de jours chauds	113
Figure 38 : Tendances des amplitudes thermiques	113
Figure 39 : Cercle de corrélation du groupe de variables G1.....	115
Figure 40 : Cercles de corrélation du groupe de variables G2	116
Figure 41 : Cercle de corrélation du groupe de variables G3.....	116
Figure 42 : Diagramme de Taylor des précipitations moyennes simulées par 10 modèles climatiques régionaux comparées aux précipitations moyennes observées.....	118
Figure 43 : Comparaison entre les précipitations moyennes mensuelles observées et simulées sur la période 1976-2005.....	119
Figure 44 : Comparaison entre les précipitations moyennes annuelles brutes simulées et celles observées sur la période de référence 1976-2005	121
Figure 45 : Comparaison entre le nombre de jours pluvieux simulées brutes et le nombre de jours pluvieux observés sur la période de référence 1976-2005	122
Figure 46 : Comparaison entre les températures minimales et maximales moyennes mensuelles observées et simulées sur la période de référence 1976-2005.....	124
Figure 47 : Comparaison entre les précipitations moyennes mensuelles simulées corrigées et les précipitations observées sur la période de référence 1976-2005	126
Figure 48 : Comparaison entre les pluies annuelles simulées corrigées et les pluies annuelles observées sur la période de référence 1976-2005	127

Figure 49 : Comparaison entre le nombre de jours pluvieux simulés corrigés et le nombre de jours pluvieux observés sur la période de référence 1976-2005	128
Figure 50 : Comparaison des températures moyennes mensuelles simulées corrigées et les températures moyennes mensuelles observées sur la période de référence 1976-2005.....	129
Figure 51 : Comparaison des pluies moyennes mensuelles sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP4.5 aux pluies moyennes mensuelles observées sur la période 1986-2016 .	131
Figure 52 : Comparaison des pluies moyennes mensuelles sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5 aux pluies moyennes mensuelles observées sur la période 1986-2016 .	132
Figure 53 : Comparaison entre les nombres de jour pluvieux sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP4.5 et le nombre de jours pluvieux observées sur la période 1986-2016.....	133
Figure 54 : Comparaison entre le nombre de jours pluvieux sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5 et le nombre de jours pluvieux observées sur la période 1986-2016.....	134
Figure 55 : Évolution mensuelle des indices de sécheresse selon le modèle CanESM2 sur la période 2021-2050.....	143
Figure 56 : Évolution mensuelle des indices de sécheresse selon le modèle CCLM4 sur la période 2021-2050.....	144
Figure 57 : Évolution mensuelle des indices de sécheresse selon le modèle RC4 sur la période 2021-2050.....	145
Figure 58 : Répartition spatiale des probabilités d'occurrence de deux années sèches successives selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2021-2050.....	150
Figure 59 : Répartition spatiale des probabilités d'occurrence de trois années sèches successives selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2021-2050.....	151
Figure 60 : Période de retour des sècheresses selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2021-2050.....	152
Figure 61 : Identification de la saison agricole dans le complexe sucrier de Ferkessédougou sur la période 2021-2050 selon le modèle RCA4.....	153
Figure 62 : Identification de la saison agricole dans le complexe sucrier de Ferkessédougou sur la période 2021-2050 selon le modèle CanESM2	154
Figure 63 : Identification de la saison agricole dans le complexe sucrier de Ferkessédougou sur la période 2021-2050 selon le modèle CCLM4	155
Figure 64 : Cartes de l'occupation des sols de 1990 et de 2006	161
Figure 65 : Carte de l'occupation des sols en 2020.....	162
Figure 66 : Évolution des classes d'occupation des sols sur la période 1990-2020.....	164
Figure 67 : Gains, pertes et Changement net de l'occupation des sols entre 1990 et 2006 .	165

Figure 68 : Changement net des catégories de l'occupation des sols de 1990 à 2006.....	166
Figure 69 : Carte des tendances de changement global de la classe bâti ou sol nu de 1990 à 2006.....	167
Figure 70 : Carte des tendances de changement global de la classe culture ou jachère de 1990 à 2006.....	168
Figure 71 : Carte des tendances de changement global de la classe lambeau de forêt de 1990 à 2006.....	169
Figure 72 : Carte des tendances de changement global de la classe plan d'eau de 1990 à 2006.....	170
Figure 73 : Carte des tendances de changement global de la classe savanes de 1990 à 2006.....	171
Figure 74 : Carte des tendances de changement global de la classe zone humide de 1990 à 2006.....	172
Figure 75 : Carte prédictive de l'occupation des sols de 2020.....	174
Figure 76 : Comparaison des classes d'occupation des sols simulées et observées de 2020.....	175
Figure 77 : Cartes de l'occupation des sols de 2035 et 2050.....	176
Figure 78 : Évolution de l'occupation des sols de 2020 à 2050.....	177
Figure 79 : Évolution temporelle du coefficient de ruissellement moyen annuel sur la période 1990-2050.....	178
Figure 80 : Bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha et ses sous bassins délimités.....	183
Figure 81 : Comparaison des débits journaliers simulés et des débits journaliers observés à la station Route Korhogo-Badikaha sur la période 1981-1985.....	185
Figure 82 : Comparaison des débits simulés et observés à la station Route Korhogo-Badikaha sur la période 1986-1990.....	185
Figure 83 : Évolution décennale des débits sur la période 1986 à 2016 à l'exutoire de bassin versant.....	186
Figure 84 : Évolution décennale des débits moyens journaliers entrants dans les retenues de.....	187
Figure 85 : Évolution décennale de l'ETP et de l'ETR.....	187
Figure 86 : Évolution décennale de l'infiltration moyenne annuelle.....	188
Figure 87 : Évolution de la recharge moyenne annuelle des aquifères souterraines.....	188
Figure 88 : Carte de répartition spatiale du ruissellement moyen annuel sur la période 1986-2016.....	189

Figure 89 : Carte de répartition spatiale de l’ETP et l’ETR sur la période 1986-2016.....	190
Figure 90 : Carte de répartition spatiale de l’infiltration sur la période 1986-2016.....	191
Figure 91 : Carte de répartition spatiale de la teneur en eau du sol sur la période 1986-2016	192
Figure 92 : Carte de répartition spatiale de la recharge moyenne mensuelle des aquifères souterraines sur la période 1986-2016.....	193
Figure 93 : Évolution du cumul annuel des sédiments dans les retenues	194
Figure 94 : Perte de la capacité des réservoirs Lokpoho et Morrison	195
Figure 95 : Bilan hydrologique sur la période 1986-2016	196
Figure 96 : Évolution des débits à l’exutoire du bassin versant sur la période 2021-2050..	197
Figure 97 : Évolution temporelle des paramètres du bilan hydrologique selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5	198
Figure 98 : Carte de distribution spatiale de lame d’eau écoulée sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5	199
Figure 99 : Carte de distribution spatiale de l’ETR sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5	200
Figure 100 : Carte de distribution spatiale de l’infiltration sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.....	201
Figure 101 : Carte de distribution spatiale de la recharge sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5	202
Figure 102 : Carte de distribution spatiale de la lame d’eau moyenne annuelle infiltrée sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5	203
Figure 103 : Carte de distribution spatiale de l’ETR moyenne annuelle sur la période 2021- 2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5	204
Figure 104 : Carte de distribution spatiale de l’infiltration sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.....	205
Figure 105 : Distribution spatiale de la recharge des nappes souterraine sur la période 2021- 2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5	206
Figure 106 : Carte de distribution spatiale de la lame d’eau écoulée sur la période 2021- 2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5	207
Figure 107 : Carte de distribution spatiale de l’ETR sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5	208
Figure 108 : Carte de distribution spatiale de l’infiltration sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.....	209

Figure 109 : Carte de distribution spatiale de la recharge sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5	210
Figure 110 : Hydrogrammes des débits observés et des débits simulés du 01 juillet au 31 décembre 1987 à la station hydrométrique Route Korhogo-Badikaha	211
Figure 111 : Hydrogrammes des débits observés et des débits simulés du 01 juillet au 31 décembre 1981 à la station hydrométrique Route Korhogo-Badikaha	212
Figure 112 : Spatialisation des écoulements après une pluie de période de période retour 5 ans au cours de la période 1986-2016	213
Figure 113 : Spatialisation des écoulements après une pluie de 10 jours consécutifs issu de la période 1986-2016.....	214
Figure 114 : Comparaison graphique des lois mises en jeu	215
Figure 115 : Spatialisation d'une crue de période de retour de 2 ans	218
Figure 116 : Spatialisation d'une crue de période de retour de 10 ans	219
Figure 117 : Spatialisation d'une crue de période de retour de 50 ans	220
Figure 118 : Spatialisation d'une crue de période de retour 100 ans	221
Figure 119 : Morphologiques des fonds du barrage de Morrison : carte bathymétrique (A) et carte des pentes (B)	227
Figure 120 : Courbe hauteur-surface de la retenue de Morrison	228
Figure 121 : Courbe hauteur-volume de la retenue de Morrison.....	228
Figure 122 : Cartes morphologiques du barrage de Lopkoho : carte bathymétrique (A) et carte des pentes (B)	229
Figure 123 : Courbe hauteur-surface de la retenue de Lopkoho	230
Figure 124 : Courbe hauteur-volume de la retenue de Lopkoho.....	230

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Matériel de terrain : Bouteille hydrologique (A), GPS portatif Garmin (B), Ben Van Veen (C), Hors-bord (D), Débit mètre OTTQliner 2 (E) et Echosondeur Elite 9 Ti (F)

Annexe 2 : Mesure de débit sur le Bandama à l'aide du débitmètre OTT Qliner2

Annexe 3 : Détermination des épaisseurs de sédiment dans les retenues

Annexe 4 : Évolution journalière des débits à l'exutoire du bassin versant (1991-2016)

Annexe 5 : Évolution journalière des débits à l'entrée des réservoirs de Morrisson et Lokpoho sur la période 1986-2016

INTRODUCTION

Le Panel Intergouvernemental sur les Changements Climatiques dans son troisième rapport d'évaluation IPCC (2001) conclu qu'un nombre croissant d'informations concernant notre planète fait état d'une atmosphère de plus en plus chaude et de divers changements dans les systèmes climatiques. Les effets du changement climatique sont manifestes avec l'apparition d'événements extrêmes comme les inondations, les sécheresses, la fonte des glaciers, la diminution des ressources en eau, ainsi que l'augmentation des maladies infectieuses (IPCC, 2012).

En Afrique de l'Ouest, la variabilité et les changements climatiques ont montré une diminution des précipitations depuis les années 1970 (Servat *et al.*, 1999 ; Kouadio, 2011). Ils ont entraîné une réduction des débits des cours d'eau et des zones humides conduisant à une accentuation des sécheresses (Kouassi, 2007 ; Goula *et al.*, 2009). La situation est encore plus préoccupante en Afrique subsaharienne où l'on pratique l'agriculture pluviale et donc soumise aux aléas du climat. Dans les zones rurales, les habitants sont hautement vulnérables aux fluctuations climatiques, principalement en raison de leur forte résilience à l'agriculture dépendante des précipitations, qui couvre près de 93 % des terres agricoles (FAO, 2003). Il est crucial de noter que 80 % des céréales consommées dans cette région proviennent de l'agriculture traditionnelle, et que le secteur agricole emploie environ 70 % de la main-d'œuvre, contribuant à hauteur de 15 à 20 % du PIB (FAO, 2003). En plus de cette dépendance, la croissance démographique rapide et le niveau de pauvreté de ces populations, qui les privent d'accès aux techniques agricoles modernes telles que la mécanisation, l'utilisation d'engrais chimiques ou l'irrigation, amplifient les effets socio-économiques du changement climatique (PNUD, 2004). Ainsi, des outils (CROPWAT, SWAT etc.) ont été développés pour optimiser et prévoir la productivité en fonction des conditions climatiques dans plusieurs de ces pays. Cependant, dans le cas des cultures comme la canne à sucre, la qualité de cette production, en particulier sa richesse en sucre, doit également être considérée dans les prévisions, car elle influence fortement le fonctionnement des usines, le rendement en sucre, le prix du tonnage et, en fin de compte, le revenu du planteur. C'est le cas à La Réunion (France) où il a été constaté que la richesse en sucre de la canne à sucre diminue de 0,48 % par degré Celsius (1°C) au niveau des parcelles à l'Est et de 0,58 % par degré Celsius (1°C) pour celles au Sud-Ouest de cette localité (Martiné, 2012). Il est important de noter que, certes les impacts actuels du changement climatique influencent la production agricole. Cependant, elle est l'un des facteurs anthropiques à l'origine du changement climatique. Alors, le défi des états et des communautés est d'éviter la spirale pauvreté / faim / dégradation de l'environnement / conflits, en développant une agriculture intelligente face au réchauffement climatique.

L'eau est un paramètre déterminant en agriculture et sa gestion est essentielle pour garantir la stabilité de la production agricole et, par extension, la sécurité alimentaire. Dans le contexte actuel de changement climatique, cela est devenu un enjeu géopolitique majeur. C'est pourquoi, la notion de l'accessibilité à l'eau est devenue un concept central dans les réflexions sur la gestion de l'eau et le développement agricole. Lors du 6^{ème} forum de l'eau, tenu à Marseille du 12 au 17 mars 2012, l'accessibilité à l'eau était au cœur des réflexions menées sur le thème « Contribuer à la sécurité alimentaire par une utilisation optimale de l'eau ». Des objectifs d'augmentation durable de la productivité de l'eau agricole en système pluvial et irrigué ont même été formulés.

En Côte d'Ivoire, les précipitations constituent l'élément climatique fondamental qui conditionne le développement des différentes activités agricoles. Ainsi, leur absence, leur rareté, leur excès / déficit ou leur mauvaise répartition spatiale et temporelle génèrent des crises (Péné & Assa, 2003). En effet, ces crises liées aux fluctuations des précipitations sont observées dans les parcelles de canne à sucre de la Sucrerie d'Afrique-Côte d'Ivoire (SUCAF-CI), une entreprise agro-industrielle et la Coopérative des Planteurs de Canne à Sucre de Ferkessédougou (CPCSF). La SUCAF-CI et la CPCSF exploitent les eaux pluviales et l'eau du fleuve Bandama pour l'irrigation de la canne à sucre, la production du sucre de canne et les besoins domestiques. A l'instar des industries agroalimentaires en Côte d'Ivoire, les besoins en eau de la SUCAF-CI et CPCSF augmentent progressivement et les ressources en eau sont de plus en plus sollicitées. Le complexe sucrier de Ferkessédougou produit en moyenne 100 000 tonnes de sucre chaque année. Cependant, la Côte d'Ivoire n'est toujours pas autosuffisante en sucre, suscitant des réactions de la part des autorités gouvernementales. C'est pourquoi, en accord avec les entreprises du secteur sucrier, le gouvernement avait lancé une campagne sucrière 2023-2024, le 22 octobre 2023. Cette campagne n'a produit que 22 900 tonnes de sucre en novembre 2023 alors que les besoins attendus étaient estimés à 27 000 tonnes (Ministère du Commerce et de l'Industrie, 2023). Ainsi, pour faire face à la pénurie de sucre, la SUCAF-CI entend étendre ses superficies agricoles. Cependant, les études sur la variabilité climatique dans la région ont révélé une diminution générale des niveaux de précipitations (Soro *et al.*, 2011 ; Fossou *et al.*, 2015). Cette baisse des précipitations a entraîné corrélativement, un déficit d'écoulement de 62,5 % (Soro, 2014). De plus, Les projections climatiques montrent que les événements météorologiques extrêmes seraient de plus en plus fréquents à mesure que le climat se réchauffe (Yapo *et al.*, 2020).

La SUCAF-CI attache une grande importance à l'innovation agricole, au développement des techniques visant à améliorer les rendements agricoles et à la durabilité des terres exploitées.

Cependant, elle ne dispose pas d'un système d'informations climatiques pour accompagner une culture de la canne à sucre résiliente aux changements climatiques.

Au vu de tout ce qui précède, on se pose la question de savoir comment optimiser la production de la canne à sucre face aux impacts du changement climatique dans le Bassin Versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha (BVHBKB)?

L'eau étant indispensable au développement de la canne à sucre et fortement dépendante aux conditions climatiques, pour mieux la gérer, il est crucial d'approfondir la compréhension des manifestations de l'irrégularité des extrêmes climatiques et leur impact sur la ressource en eau et la production de la canne à sucre. C'est dans cette optique que cette étude qui a pour thème : «évaluation spatio-temporelle des ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama pour l'optimisation de la production de la canne à sucre : cas des complexes sucriers de Ferkessedougou (Nord de la Côte d'Ivoire)» est initiée. Elle vise de façon générale à analyser l'évolution conjointe du climat, de la dynamique de l'occupation des sols et de la réponse hydrologique du BVHBKB dans le temps et dans l'espace. Il s'agit de façon spécifique de :

- caractériser le changement climatique sur la période 2021-2050 ;
- évaluer la dynamique de l'occupation des sols sur la période 2021-2050 ;
- simuler l'évolution des ressources en eau sur la période 2021-2050 ;
- analyser l'adéquation disponibilité-besoin en eau dans les complexes sucriers de Ferkessedougou sur la période 2021-2050.

Le présent mémoire est subdivisé en trois grandes parties. La première partie porte sur les caractéristiques physiques, socio-économiques du bassin versant du Haut Bandama à Badikaha, sur des concepts liés aux phénomènes de changement climatique et l'état de l'art. La deuxième partie présente les données climatiques, hydro-climatiques et l'approche méthodologique décrivant la description de différents processus de traitements de données utilisés. La troisième partie est consacrée à la présentation des résultats obtenus et la discussion qui s'en dégage. Elle décrit d'abord les caractéristiques des paramètres, hydro-climatiques et l'occupation des sols. Ensuite, elle donne l'évolution des ressources en eau sur la période 2021-2050. Enfin, elle présente les résultats de l'analyse de l'adéquation disponibilité-besoins en eau des complexes sucriers de Ferkessedougou. Ce travail se termine par une conclusion générale qui dresse le bilan des connaissances acquises au cours de cette étude ainsi que les recommandations et les perspectives de recherche.

PARTIE I : GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE 1 : CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET SOCIO-ÉCONOMIQUES DU BASSIN VERSANT DU HAUT BANDAMA A ROUTE KORHOGO BADIKAHA

Ce chapitre fait ressortir les traits caractéristiques du bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha (BVHBKB). Ces aspects concernent la situation géographique du bassin versant, le contexte socio-économique, la géologie et le climat du BVHBKB.

1.1. Situation géographique

La zone d'étude correspond à une sous-section du fleuve Bandama appelée bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha (BVHBKB), couvrant une superficie d'environ 9 688 km². Ce bassin versant, positionné entre 5°00' et 6°16' de longitudes Ouest et 9°09' et 10°15' de latitudes Nord, englobe les degrés carrés des régions du Poro, du Tchologo, et partiellement de la Bagoué. Il représente environ 15 % de la totalité du bassin versant du Bandama (Figure 1).

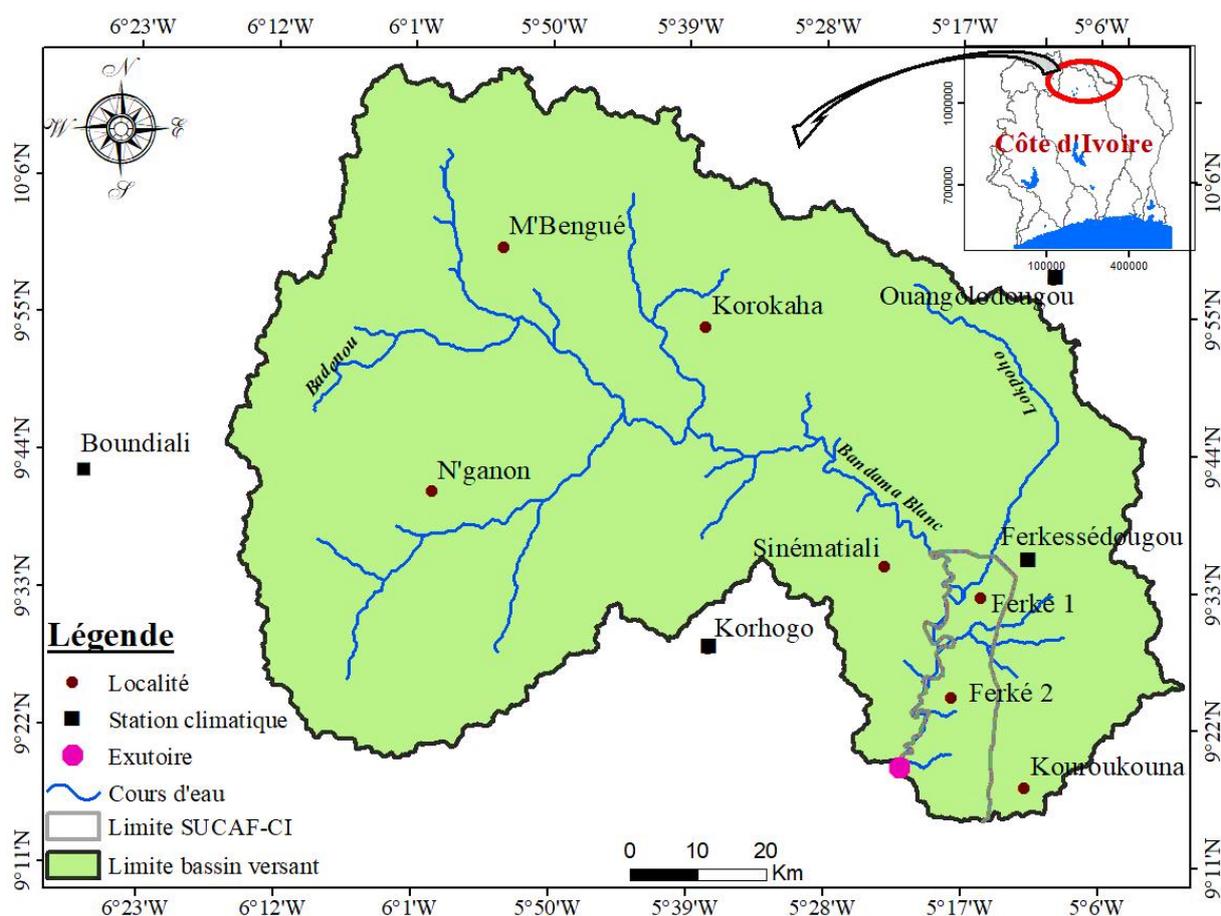


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant du Haut Bandama à Route Korhogo-Badikaha

1.2. Hydrographie

Le cours d'eau principal du BVHBKB appelé Bandama blanc prend sa source dans le Nord de la Côte d'Ivoire à une altitude d'environ 480 mètres. Initialement, il coule d'Ouest en Est sur une distance d'environ 200 km, suivant un arc de cercle autour de Korhogo (Figure 2), avant de changer de direction et de s'orienter du Nord au Sud, caractérisé par de nombreux méandres. Dans sa partie amont, le bassin versant du Haut Bandama est principalement alimenté par le Bandama Blanc et ses principaux affluents, tels que le Lopkoho et le Badérou (Soro, 2014).

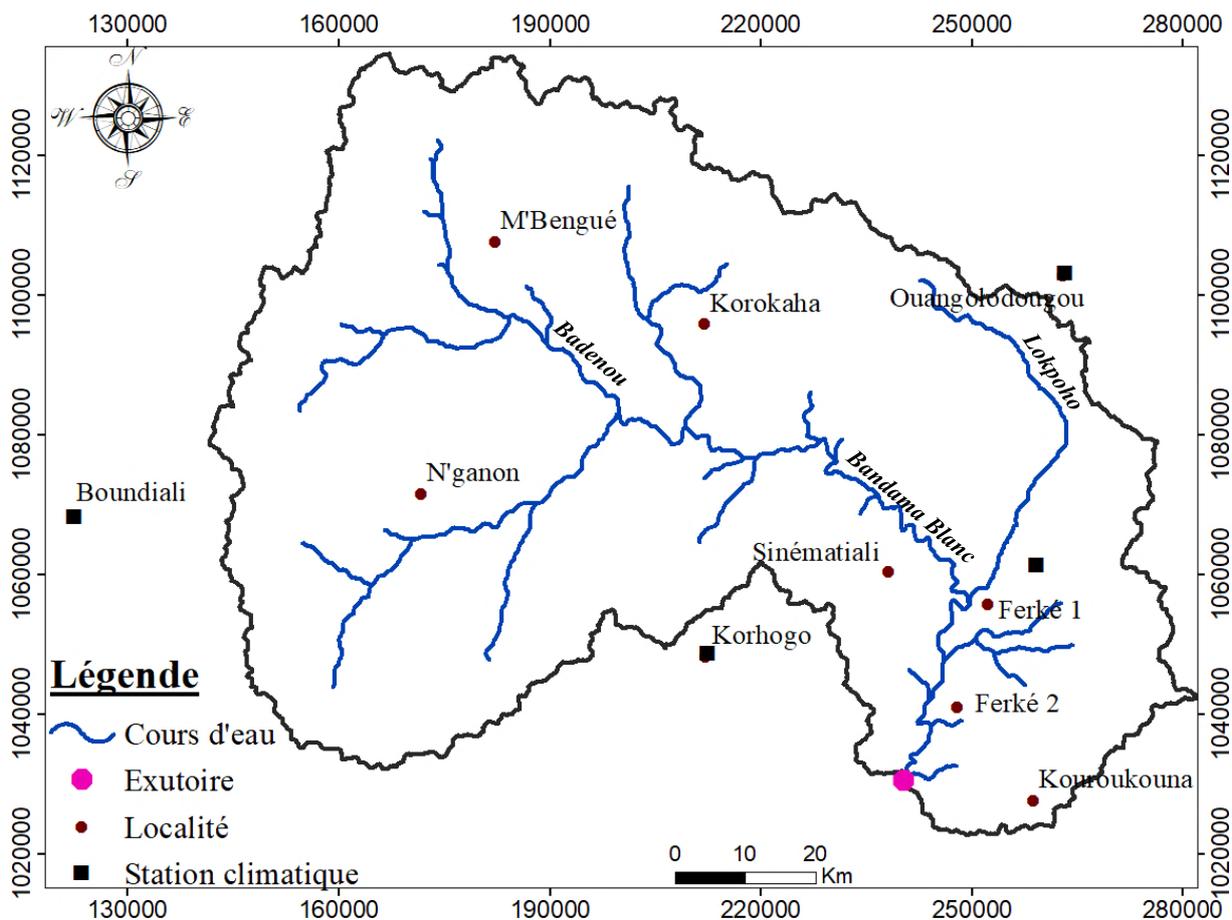


Figure 2 : Carte du réseau hydrographique du BVHBKB

1.3. Géomorphologie

Le BVHBKB présente dans l'ensemble, un relief peu accidenté avec toutefois une légère inclinaison du Nord vers le Sud. La carte géomorphologique (Figure 3) réalisée à partir d'un modèle numérique de terrain (SRTM = Shuttle Radar Topography Mission), permet de montrer que le relief du BVHBKB présente deux niveaux. Un premier niveau d'altitudes comprise entre 250 et 300 m, la zone en question se caractérise par une étendue de plaine et un deuxième niveau d'altitudes allant de 300 à 650 mètres, qui est composé de plateaux. Les plateaux, qui occupent plus de 75 % de la superficie totale du bassin versant, sont principalement plats (horizontaux

ou subhorizontaux). La spécificité de cette structuration favorise l'émergence d'étendues d'eau, la pénétration des eaux dans le sol et offre ainsi la possibilité d'alimenter en eau les réserves souterraines (Biémi, 1992).

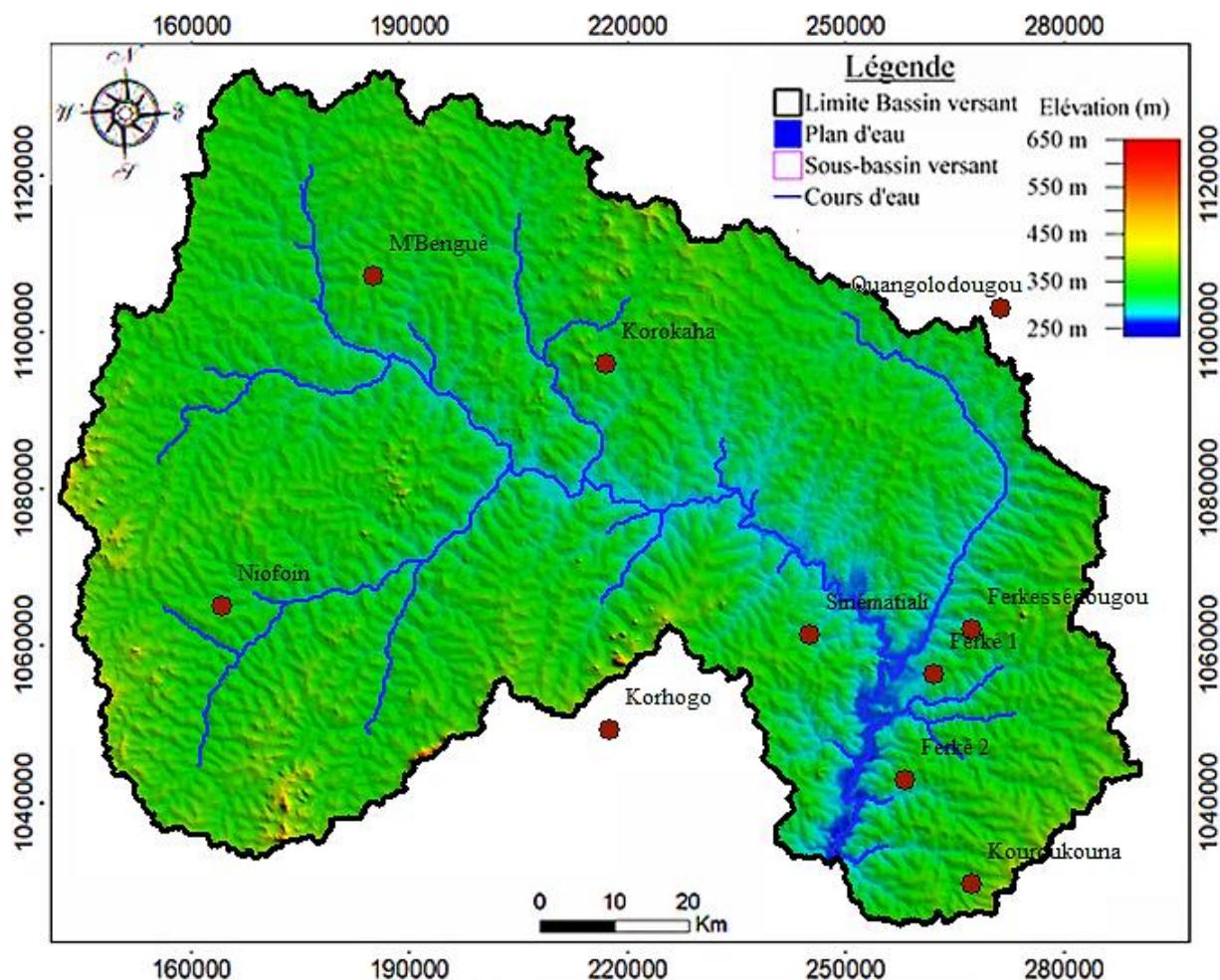


Figure 3 : Relief du bassin versant du Haut Bandama à Badikaha à Route Korhogo-Badikaha

1.4. Hydrogéologie

Les études menées sur le BVHBKB ont révélé la présence de réservoirs d'eau souterraine dans les roches cristallines et cristallophylliennes (Jourda, 2005). Dans cette zone, on distingue deux types d'aquifères, généralement superposés : les aquifères d'altérites, qui sont des formations géologiques superficielles (souvent meubles) formées in situ par altération physico-chimique des roches sous-jacentes, et les aquifères de fissures ou de fractures, situés plus en profondeur et issus d'événements tectoniques créant des discontinuités telles que les failles, les diaclases et les décrochements (Jourda, 2005).

1.5. Sols du bassin versant du Haut Bandama Badikaha

L'étude des sols menée par Perraud (1971) révèle que le bassin est majoritairement composé de sols ferrallitiques modérément à fortement désaturés. À ceux-ci s'ajoutent des sols ferrallitiques faiblement désaturés ainsi que des sols bruns eutrophes tropicaux, issus de roches basiques. Par endroits, on observe également la présence de sols hydromorphes dans les bas-fonds, de vertisols en pied de pente, de métasédiments métavolcaniques (sable fin) (Ouédraogo, 2016) à l'Ouest du bassin versant et de lithosols résultant de conditions particulières de drainage des roches ou d'érosion. De nombreuses zones cuirassées sont également identifiées. En général, ces sols sont peu humifères et présentent une fertilité moyenne (Zagbaï *et al.*, 2006).

1.6. Géologie

Du point de vue géologique, la faible intensité du processus de métamorphisme permet de classer les formations en deux catégories principales : les formations d'origine sédimentaire et les formations d'origine volcanique (Arnould, 1961). On peut également observer la présence sur le BVHBKB de formations de source éruptive ainsi que des roches métamorphiques dérivées de roches sédimentaires, telles que des schistes variés et des micaschistes associés à des grauweekes. Les roches volcaniques se caractérisent par la présence d'amphiboles, d'albites, de chlorites et d'épidotes en formes feutrées, ainsi que par quelques roches basiques grenues. (Ouédraogo, 2016) (Figure 4).

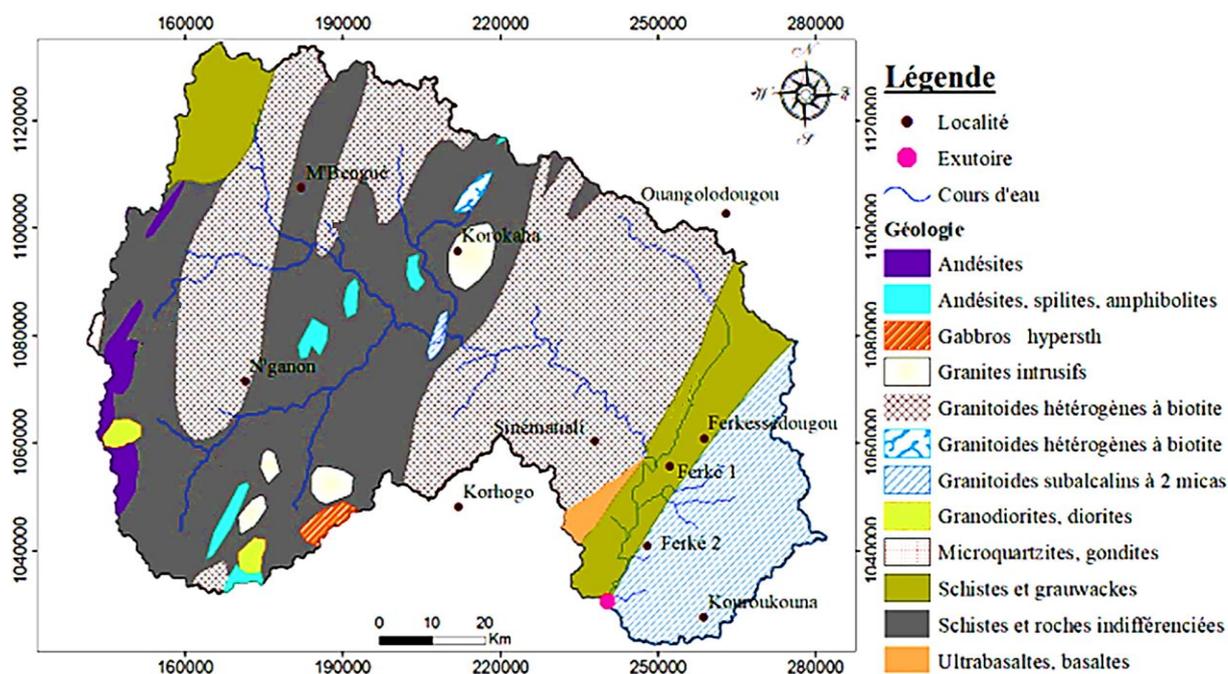


Figure 4 : Carte géologique à l'échelle 1/200 000 du BVHBKB
Source : GEOMINE (1982)

1.7. Climat

Le BVHBKB présente un climat tropical de transition caractérisé par un régime pluviométrique tel que décrit par Soro *et al.* (2013). Ce régime se divise en deux saisons principales :

- une grande saison des pluies s'étendant d'avril à Octobre, avec des niveaux moyens de précipitations mensuelles oscillant entre 129,3 et 224,3 mm ;
- une longue saison sèche de novembre à mars, durant laquelle les précipitations moyennes varient de 1,9 à 82,5 mm.

Les températures moyennes mensuelles varient de 25°C en août à 29,3°C en mars (Figure 5).

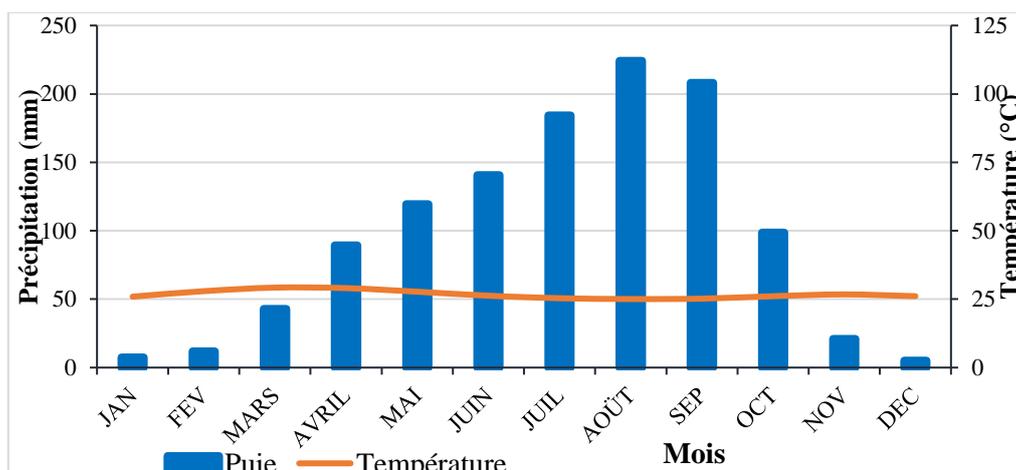


Figure 5 : Diagramme ombrothermique de 1986-2016 à la station synoptique de Ferké 2

1.8. Vent

Dans le contexte de l'Afrique de l'Ouest, les observations concernant la circulation atmosphérique du BVHBKB fournissent la principale explication quant au modèle de vents : durant la période de sécheresse, l'harmattan souffle en provenance des directions Est et Nord-Est. Pendant la saison pluvieuse, la mousson provenant des régions Sud-Ouest ou Sud prévaut, ce qui demande également de prendre en compte les rafales de vents très intenses précédant les tornades, caractérisées par leur vitesse élevée et leurs effets dévastateurs fréquents (Brunet-Moret *et al.*, 1986). Au nord de la Côte d'Ivoire précisément dans le BVHBKB la vitesse du vent fluctue en général entre 0,53 et 3,26 m/s (Anoh, 2014).

1.9. Végétation

Dans le contexte des conditions climatiques de la Côte d'Ivoire, le BVHBKB se caractérise par une végétation soudanaise, regroupant aussi bien des forêts claires que des savanes. La nature de la savane varie en fonction de la composition de la flore, se manifestant sous des formes boisées, arborées, arbustives ou herbacées (Soro *et al.*, 2013).

1.10. Aspects socio-économiques

La population majoritaire dans la région est composée en grande partie des Sénoufos, des autochtones qui exercent principalement dans l'agriculture et l'élevage. Ils sont répandus sur l'ensemble de la région, mais les concentrations les plus importantes se trouvent dans les villes telles que Korhogo, Ferkessedougou, M'bengué et Sinématiali. Ces localités comptent respectivement 748 393, 190 140, 114 971 et 12 693 habitants (INS, 2021). Les cultures vivrières prédominantes comprennent le maïs, le riz, le mil, l'igname, la patate, l'arachide, le sorgho, entre autres. En ce qui concerne les cultures destinées à des fins industrielles, la canne à sucre, le coton et l'anacarde sont les plus cultivés et, la SUCAF-CI est solidement établie pour la culture de la canne à sucre à travers deux complexes sucriers : Ferké I et Ferké II. L'élevage est une activité répandue qui concerne principalement les bovins, les ovins, les caprins, les porcins et la volaille.

Les habitants des zones rurales du bassin versant sont principalement engagés dans les activités agricoles et/ou d'élevage. Les cultures principales incluent :

- les cultures vivrières (patate douce, arachide, riz, mil, maïs, sorgho, igname, fonio, etc.) ;
- les cultures annuelles de rente (tabac, coton, canne à sucre, etc.) ;
- les cultures maraîchères (piment, aubergine, tomate, choux, etc.) ;
- les cultures pérennes de rente (anacarde, agrumes mangues, etc.).

La région est également reconnue comme une destination touristique prisée. Cette attractivité découle de la présence de villages d'artisans situés aux alentours de Korhogo, ainsi que le village des forgerons de Koni, réputé pour ses gisements de fer, situé à environ 20 km le long de la route Korhogo-M'bengué.

Conclusion partielle

Le bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha a un relief plat, parsemé de plateaux et de colline par endroits avec des altitudes allant de 250 à 650 m. il est traversé par le Bandama Blanc avec pour principaux affluents Lopkoho et Badéno. La structure géologique en place est dominée par les granitoïdes et les schistes. La culture de canne à sucre est la principale activité économique dans cette zone suivit du coton et l'anacade. Cependant, les populations cultivent également les cultures telles que le coton, le tabac, le maïs l'igname, le soja, le sorgho, la culture maraîchères, le riz, etc. Le régime des précipitations dans le BVHBKB présente un schéma unimodal typique du climat tropical de transition. Les précipitations mensuelles moyennes oscillent entre 129,3 et 250,4 mm, tandis que les températures moyennes mensuelles varient de 25°C en août à 29°C en mars.

CHAPITRE 2 : CONCEPTS DE BASES ET ÉTAT DE L'ART

L'impact du changement climatique sur les ressources en eau et l'agriculture est indéniable et a suscité beaucoup d'intérêt vu les études qui ont été menées à ce sujet (Soro *et al.*, 2011 ; Kouakou, 2011 ; GIEC, 2014). Pour une meilleure connaissance des thèmes liés à ce phénomène, une brève synthèse de ces études et la définition des concepts liés à cette étude sont présentées dans ce chapitre.

2.1. Connaissances sur la variabilité et le changement climatique

2.1.1. Climatologie

La climatologie est une discipline de la géographie physique qui se concentre sur l'analyse prolongée des conditions météorologiques et atmosphériques d'un endroit spécifique. Elle repose sur l'analyse de la répartition statistique des variables météorologiques telles que la température et les précipitations dans une région spécifique sur une période d'au moins trente ans. Elle se distingue de la météorologie, qui se concentre sur l'état des variables atmosphériques à des échelles de temps très courtes, comme des heures ou des journées. Par conséquent, un événement météorologique tel qu'une canicule ou une tempête ne peut pas être simplement interprété comme un changement climatique.

2.1.2. Agro-climatologie

L'agro-climatologie est la discipline qui décrit, explicite, classe les climats et envisage les implications pour l'agriculture. Elle identifie les facteurs climatiques potentiellement influents sur le développement agricole tels que les précipitations, la végétation, la température, entre autres. Dans un contexte agricole, cette approche ne se concentre pas sur la biologie des plantes, mais cherche à comprendre les mécanismes de croissance végétative. Cela permet, pour une plante spécifique et un climat donné, de quantifier les besoins en eau nécessaires à sa production optimale, connus sous le terme de besoins en eau des cultures. Pour parvenir à cette quantification, il convient d'étudier les facteurs climatiques qui influent ou interagissent avec la plante tout au long de son développement végétatif.

L'intérêt de l'agro-climatologie est que, d'une part, l'agriculture étant étroitement tributaire du temps et du climat, l'agriculteur peut voir ses efforts compromis ou anéantis par des aléas météorologiques et d'autre part, l'agriculteur peut avoir une production agricole abondante et de qualité en relation avec des conditions agro-météorologiques favorables.

Les domaines d'intérêt de l'agro-climatologie se trouvent dans :

- l'analyse de la durée des saisons sèches et humides, du bilan hydrique à la parcelle, de la gestion rationnelle des pâturages ;

- le suivi et amélioration des niveaux de productions agricoles ;
- le suivi des cultures avec la connaissance de leur degré de résistance à la sécheresse ;
- la recherche en physiologie végétale, en bioclimatologie.

2.1.3. Variabilité climatique

La variabilité climatique est une fluctuation naturelle du climat sur une base annuelle (modification de la longueur ou l'intensité des saisons), ainsi que d'une année à l'autre (année sèche année humide). Cette variation est définie par l'écart par rapport à la moyenne climatique, reflétant ainsi la diversité naturelle du climat à différentes échelles temporelles, à la fois à l'intérieur d'une année et d'une année à l'autre. En termes plus généraux, c'est la magnitude des fluctuations climatiques à diverses échelles temporelles et spatiales. La variabilité climatique s'exprime de deux façons différentes (Moron, 1994) : soit sous forme d'oscillation périodique ou non (écart type au sens statistique) qui n'entraîne pas de modification de l'écosystème ; soit sous forme de rupture d'équilibre qui peut être graduelle (tendance) et qui ont toujours un impact considérable sur les écosystèmes (Barring, 1993). C'est ce dernier cas qui apparaît de plus en plus en Afrique depuis 1970, induisant ainsi une tendance pluviométrique et hydrologique à la baisse.

En Côte d'Ivoire, la variabilité climatique s'est traduite aussi par une alternance de phases sèches et humides qui a engendré l'apparition de ruptures dans les séries pluviométriques mesurées dans le pays. Ces ruptures ont entraîné à leur tour des déficits pluviométriques qui varient de 10 à 30 % (Servat *et al.*, 1998 ; Goula *et al.*, 2006 ; Kouakou *et al.*, 2007). La longue période de déficits pluviométriques (1970-2000) a eu un effet prononcé sur les écoulements et les réserves en eaux souterraines, notamment pendant les périodes 1970-1974 et 1981-1993. La baisse dans les écoulements atteint parfois les 50 % (Goula *et al.*, 2009). En Côte d'Ivoire, il y a eu un tarissement des cascades, du tronçonnement de la plupart des cours d'eau. Par exemple, il a été observé un déficit de 36 % au niveau du Sassandra à la station hydrométrique de Semien (Servat *et al.*, 1998). Cette baisse a entraîné une réduction des réserves d'eau mobilisées dans les nappes phréatiques (Savané *et al.*, 2001). Des études ont montré une rupture entre 1969 et 1970 dans la série des débits moyens annuels sur le Sassandra (Servat *et al.*, 1998), à Bafingdala à Soubré (Aka *et al.*, 1996). Au niveau du bassin versant de la Comoé, les déficits enregistrés dans les écoulements varient de 43 à 54 % (Kouakou *et al.*, 2007 ; Goula *et al.*, 2009). Et enfin au niveau du bassin versant du haut Bandama à Tortiya, les modules interannuels avant et après la rupture pluviométrique en 1970 sont respectivement de 101,6 m³/s et 38,1 m³/s, soit un déficit

d'écoulement de 62,5 % montrant ainsi la répercussion de la baisse pluviométrique sur les écoulements sur la période 1950-2000 (Soro *et al.*, 2014).

2.1.4. Changement climatique

Le concept de changement implique une transformation dans le cours de l'évolution d'un phénomène. Ainsi, lorsque l'on parle de "changement climatique", on fait référence à la transformation du climat sur une période de temps significative. L'article 1 de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), montre que cette expression englobe toutes les variations climatiques qui sont attribuables à l'activité humaine. Ces variations modifient la composition de l'atmosphère mondiale et s'ajoutent à la variabilité naturelle du climat. Au niveau de la communauté scientifique, les changements climatiques sont dus à l'effet conjoint de l'activité humaine et de la variabilité naturelle du climat (GIEC, 2007).

2.1.4.1. Causes du changement climatique

Cela fait plus de cent ans, l'homme a altéré la composition chimique de l'atmosphère en libérant de manière croissante et persistante des gaz à effet de serre (GES) tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), les composés azotés, les gaz fluorés, ainsi que des particules comme les aérosols sulfatés (Driouech, 2010). Ces GES, présents naturellement dans l'atmosphère, jouent un rôle vital en retenant la chaleur dans les couches inférieures de l'atmosphère, créant ainsi des conditions propices à la vie sur Terre. Toutefois, depuis l'avènement de l'ère industrielle, les activités humaines ont provoqué une augmentation de leurs concentrations atmosphériques, perturbant ainsi l'équilibre énergétique de la planète (GIEC, 2007 ; GIEC, 2012). Le dioxyde de carbone (CO₂) est le principal gaz à effet de serre émis par les activités humaines (Tiémoko *et al.*, 2020a ; 2020b). Son évolution est évaluée par divers scénarios de changement climatique selon le GIEC (2007) en allant du scénario de stabilisation (RCP2.5), d'optimisme (RCP4.5) au plus pessimiste (RCP8.5). Il est responsable d'environ 63% du réchauffement de la planète. Les sources de production de ces gaz sont les feux de brousse, les combustibles fossiles (Tiémoko *et al.*, 2020b), etc.

2.1.4.2. Phénomènes extrêmes climatiques

La définition d'extrêmes climatiques n'est appropriée que dans le domaine dans lequel il est considéré (Beniston & Stephenson, 2004). En effet, cette définition peut être basée sur :

- la rareté d'un phénomène climatique : dans ce cas on doit donc considérer sa fréquence d'occurrence ;

- l'intensité d'un phénomène : ceci implique alors la considération des dépassements d'un seuil par des variables climatiques (par exemple la température, les précipitations, le vent, etc.) associées à ce phénomène ;
- et la notion d'impact sur les dégâts socio-économiques causés par un phénomène.

Cette étude adopte la définition proposée par le GIEC (2007) qui stipule qu'un phénomène climatique extrême est un événement rare dans le cadre de sa distribution de référence statistique à un endroit spécifique sur une longue durée, et qui ne prend en compte que leur fréquence et leur intensité. Selon Abdelnour *et al.* (2002), l'événement climatique extrême ou phénomène climatique extrême représente les queues de distribution qui apparaissent à des échelles spatiales et temporelles différentes. Ici, c'est l'évolution de ces extrêmes du point de vue climatologique qui est ciblée.

L'intensité des précipitations et températures extrêmes correspondent plutôt à un dépassement de seuil (Lionello *et al.*, 2006 ; Boudevillain *et al.*, 2009 ; Colmet-Daage, 2018). On distingue en outre, les événements extrêmes simples et les événements extrêmes complexes. Alors que les phénomènes climatiques extrêmes simples se décrivent par une seule variable (par exemple, la température ou la précipitation, etc.) qui atteint une certaine valeur, les phénomènes climatiques extrêmes complexes quant à eux impliquent un ensemble de variables associées à un événement climatique particulier. Par exemple, le passage d'un cyclone se caractérise à la fois par des précipitations intenses et un vent violent. Les précipitations extrêmes se manifestent par l'arrivée soudaine et abondante d'eau sur une période relativement courte, allant d'une heure à une journée. Ce volume peut correspondre à ce qui est normalement enregistré sur une période mensuelle, voire sur plusieurs mois (ONERC, 2018).

2.1.4.3. Différents types de sécheresses (Hydrologique, météorologique et agronomiques)

Une sécheresse se caractérise par trois principaux aspects : son intensité, sa durée et l'étendue spatiale. L'intensité est évaluée en fonction de la déviation par rapport à la normale de plusieurs paramètres, tels que les précipitations, les niveaux des réservoirs, l'humidité des sols ou encore divers indicateurs de sécheresse. Comme la sécheresse est définie de manière relative par rapport aux conditions habituelles, elle peut affecter l'ensemble de la planète, y compris les zones humides (Dai, 2011). La durée d'une sécheresse peut varier d'un mois à plusieurs décennies dans les cas les plus extrêmes. Cela justifie l'utilisation de variables mensuelles et d'indices multi-échelles dans nos analyses. L'étendue spatiale, quant à elle, peut aller de la taille

d'un département à celle d'un continent. Face à la complexité de ce phénomène, il est indispensable de définir des indicateurs permettant de suivre et d'étudier les sécheresses.

Il existe 3 types de sécheresses :

- la sécheresse agronomique, liée à l'humidité des sols, se manifeste lorsque les sols deviennent secs. Elle peut être provoquée par des précipitations inférieures à la normale, moins fréquentes mais plus intenses, une évapotranspiration accrue ou encore par un ruissellement plus important ;
- la sécheresse hydrologique, quant à elle, concerne la quantité d'eau dans les réservoirs et les cours d'eau. Elle survient lorsque ces réserves ne se reconstituent pas suffisamment ;
- la sécheresse météorologique se définit par un déficit de précipitations par rapport à la normale, sur une durée qui peut s'étendre d'un mois à plusieurs années. Ce type de sécheresse constitue un événement climatique extrême, souvent provoqué par des anomalies persistantes à grande échelle des températures de surface de la mer.

Durant les dernières décennies, les scientifiques ont élaboré, confirmé et analysé une diversité d'indicateurs de sécheresse.

L'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) préconise l'utilisation de l'Indice de Précipitations Standardisées (SPI) défini par McKee *et al.* (1993) pour caractériser les types de sécheresses. En effet, L'Indice Standardisé de Précipitation (ISP) présente une combinaison de puissance, de facilité d'utilisation et de simplicité de calcul. En réalité, seules les données sur les précipitations sont nécessaires pour calculer cet indice. De plus, l'Indice Standardisé de Précipitations (SPI) se montre aussi pertinent pour l'analyse des périodes humides que pour celle des périodes sèches.

Serrano *et al.* (2010), compare le SPEI (Indice Standardisé de Précipitation Évapotranspiration) au SPI (Indice de Précipitation Standardisé) au PDSI (Indice de Sévérité de la Sécheresse de Palmer) et montre qu'en variabilité inter annuelle, sous les conditions climatiques actuelles et des variations de températures modérées, les trois indicateurs présentent des résultats similaires. Ils concluent que l'intégration de l'évapotranspiration (SPEI & PDSI) ne contribue pas significativement à la compréhension dans les zones où la variabilité interannuelle de la température est restreinte. Cette conclusion confirme également que les périodes de sécheresse sont principalement influencées par un déficit de précipitations. Par ailleurs, Émilie (2014) a montré en climat récent que le SPI était plus performant pour détecter les sécheresses agronomiques et les sécheresses hydrologiques par rapport aux indices SPEI et PDSI.

2.1.5. Modélisation climatique

2.1.5.1. Définition

Un modèle climatique est un instrument numérique utilisé pour représenter le climat, basé sur des équations mathématiques décrivant la dynamique des fluides ainsi que les principes de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. Il englobe l'ensemble du système climatique terrestre, intégrant l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la surface terrestre et la biosphère, et étudie leurs interactions (GIEC, 2007).

Une projection climatique est la réponse simulée du système climatique, dérivée d'un modèle climatique, basée sur des hypothèses formulées quant à l'évolution future des émissions d'aérosols et de gaz à effet de serre. Selon l'échelle et la précision, différentes catégories de modèles climatiques pour l'avenir existent. En revanche, la prévision climatique tente de décrire l'évolution réelle future du climat (GIEC, 2007).

2.1.5.2. Modèles climatiques

Les modèles climatiques globaux (MCG) sont des représentations mathématiques simplifiées du système climatique fondées sur des lois de la physique. Dans les MCG, l'ensemble des différents éléments du système (atmosphère, biosphère, hydrosphère et cryosphère) ont été couplés. Les équations mathématiques sont résolues à l'aide de grilles tridimensionnelles couvrant la surface du globe. La totalité de la surface de la terre et des océans est subdivisée en milliers de colonnes (GIEC, 2007). Les colonnes elles-mêmes sont subdivisées en une multitude de couches. Plusieurs couches peuvent constituer une maille donnée de la représentation. Ainsi, les MCG ont généralement une résolution horizontale comprise entre 250 et 600 km, composés de 10 à 20 couches verticales dans l'atmosphère et souvent jusqu'à 30 couches dans les océans. La résolution temporelle du modèle constitue la fréquence à laquelle les processus sont calculés dans le modèle (GIEC, 2007).

Les premiers modèles étaient des structures simplifiées fondées sur les interactions entre deux ou trois éléments du système climatique (terre, océan et atmosphère) (McGuffie & Henderson-Sellers, 2001). Les MCG ne sont pas adaptés à la modélisation de climat local et ne rendent pas compte de manière adéquate des variations de la végétation, de la topographie et de zones littorales complexes, qui sont d'importants aspects de la réponse physique qui régit le signal de changement climatique régional ou local. Les Modèles Climatiques Globaux (MCG) présentent une résolution spatiale insuffisante pour analyser les répercussions du climat au niveau du bassin versant (Bauwens *et al.*, 2013), raison pour laquelle des méthodes de descente d'échelle sont utilisées afin d'obtenir à partir de ces MCG, des modèles climatiques régionaux (MCR) à

plus forte résolution spatiale. Depuis les années 1990, ces nouveaux modèles climatiques régionaux (MCR), caractérisés par une haute résolution spatiale parfois inférieure à 10x10 km² sont développés (Castel *et al.*, 2010). Les MCR sont des représentations mathématiques des processus physiques à une petite échelle par rapport aux MCG (Kouakou, 2011).

2.1.5.3. Scénarios climatiques

Un scénario climatique est considéré comme une description plausible du climat futur, et ce sur la base d'une ou de plusieurs projections climatiques. Un scénario plausible est lié non seulement aux hypothèses de la croissance démographique et économique, mais aussi à la manière dont les sociétés réagiront à l'avenir, à l'introduction de politiques telles que les taxes sur les combustibles fossiles (IPCC, 2000). Les scénarios climatiques représentent chacun, une évolution différente du climat sur le plan économique, démographique, technologique, social et environnemental. Quatre scénarios, ont été d'abord développés par le Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) à savoir A1, A2, B1 et B2.

Néanmoins, malgré le succès des précédents exercices de scénarisation du GIEC, notamment les SRES qui ont largement servi de référence pour les projections d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), de nouveaux scénarios ont été élaborés. Guivarch et Rozenberg (2013) ont identifié cinq raisons à cela : (i) l'évolution des facteurs socio-économiques depuis les années 2000, (ii) le fait que le rapport spécial sur les scénarios d'émissions ne prenaient en compte que des scénarios sans mesures politiques climatiques, (iii) les progrès réalisés dans les modèles physiques du climat, nécessitant des données plus détaillées, (iv) l'insuffisance des scénarios existants pour étudier les impacts et l'adaptation, et (v) l'élargissement de la portée des modèles utilisés dans la communauté de recherche sur le changement climatique, couvrant désormais de nombreux domaines simultanément. Les nouveaux scénarios dits Representative Concentration Pathways (RCP), en français Profils Représentatifs des Concentrations, sont des profils représentatifs de l'évolution des concentrations en gaz à effet de serre, d'ozone et des aérosols. Ils sont innovants puisque contrairement aux SRES, ils ne visent plus à caractériser l'évolution de la société, l'économie et la démographie, mais sont définis comme des profils de référence. Ces projections induisent des changements dans les forçages radiatifs et des augmentations de température qui dépassent la portée des scénarios SRES précédemment utilisés. Les RCP sont cohérents par rapport au vaste ensemble de scénarios décrits dans la documentation évaluée par le GIEC (GIEC, 2014). Selon le rapport du GIEC (2014), les quatre nouveaux scénarios RCP issus du forçage radiatif pour 2100 se décrivent comme suit :

- Le RCP2.6 encore appelé RCP3PD, représente la trajectoire du forçage du système climatique qui atteint un pic de 3W/m^2 au milieu du XXI^e siècle suivi d'une diminution jusqu'à $2,6\text{W/m}^2$ en 2100 (GIEC, 2014). Cependant, il existe plus de 20 scénarios publiés conduisant à un forçage semblable au RCP2.6. Il représente le champ de scénario le plus bas nécessitant des politiques climatiques très rigoureuses pour limiter les émissions.
- Le RCP4.5 décrit la stabilisation sans dépassement de 4.5W/m^2 et une stabilisation après 2100 (Clarke *et al.*, 2007). Il présente une série similaire de mesures politiques climatiques à celles des scénarios d'émissions faibles, tels que le scénario SRES B1.
- Le RCP6 est semblable au RCP4.5, avec une stabilisation sans dépassement à 6W/m^2 et une stabilisation après 2100 (Fujino *et al.*, 2006). Cependant, le nombre de scénarios d'atténuation publié dans la littérature est bas, mais plusieurs scénarios de référence (politique non climatique) correspondent à ce niveau de forçage.
- Le RCP8.5 se caractérise par une augmentation continue du forçage radiatif, atteignant $8,5\text{W/m}^2$ en 2100 (Riahi *et al.*, 2007). Récemment, 40 scénarios ayant un niveau de forçage semblable à ce scénario ont été identifiés par Van Vuuren *et al.* (2011). Il est représentatif d'une grande fourchette de scénarios de politiques non climatiques.

2.1.5.4. Incertitudes des modèles climatiques

Il existe plusieurs sources d'incertitude dans le processus de modélisation climatique. Que ce soit avec les imperfections des MCG ou des MCR, les scénarios d'émission d'aérosols et de GES ou la variabilité naturelle du climat, les prévisions climatiques présentent un niveau variable d'incertitude (Hughes *et al.*, 2011). Ces incertitudes existent en dépit de la performance de plus en plus avérée des modèles climatiques. Au niveau d'un modèle, la diversité des caractéristiques climatiques et des traits géographiques à l'intérieur d'une maille est inévitablement simplifiée et donc l'utilisateur du modèle ne possède aucune information quant à la variabilité spatiale à l'intérieur d'une maille (Kouakou, 2011).

Cependant, ces incertitudes n'entachent pas le degré de confiance grandissant à ces modèles climatiques. Ils reproduisent de façon satisfaisante les diverses composantes du climat tels que la répartition des zones climatiques, le rythme des saisons par endroits, les courants atmosphériques et océaniques (Ardoin-Bardin, 2004).

La principale origine des incertitudes réside dans la sélection du Modèle Climatique Global Atmosphère-Océan (MCGAO). Se fier à un seul modèle climatique à grande échelle (MCGAO) ne permet pas de prendre en compte toutes les incertitudes de manière exhaustive. Pour remédier à cette limitation, la pratique la plus exhaustive implique l'utilisation d'une série de

MCGAO quasi-indépendants pour former un ensemble multi-modèle (GIEC, 2008). Cette approche est aujourd'hui largement adoptée comme norme (Graham *et al.*, 2011) car non seulement elle génère plusieurs trajectoires évolutives du climat, mais elle aide également à diminuer les incertitudes associées aux MCGAO (Faramarzi *et al.*, 2013).

Par ailleurs, le faible consensus entre projections des MCR du Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5) sur la tendance des précipitations au-delà de 2040 indique déjà les biais qui caractérisent les différents modèles. Plusieurs travaux ont démontré que les sorties des modèles climatiques régionaux (MCR) ne peuvent pas être utilisées directement comme entrées des modèles d'impact en raison des biais systématiques qu'ils présentent, comme mentionné par Piani *et al.* (2010), Hagemann *et al.* (2011), et Kaboré *et al.* (2015). Ces biais sont issus de diverses sources, telles que : (i) une prise en compte insuffisante des propriétés de la surface du sol, telles que l'orographie, (ii) des erreurs transférées des modèles climatiques globaux (MCG) vers les MCR (problème de conditions aux limites), et (iii) des erreurs découlant des résolutions numériques et de la paramétrisation des modèles (Frei *et al.*, 2003 ; Maraun *et al.*, 2010 ; Wetterhall, 2012). Il est alors nécessaire de corriger ces biais au regard des données observées.

2.1.5.5. Impact du changement climatique sur les températures futures

Selon les dernières recherches du GIEC, le réchauffement global d'ici la fin du XXI^e siècle (par rapport à la période de référence 1976-2005) est estimé dans une fourchette probable de 0,3 à 1,7 °C pour le scénario RCP2.6, tandis qu'il pourrait atteindre 2,6 à 4,8 °C pour le scénario RCP8.5 (IPCC, 2013).

Cependant, il est noté que la température continuera à présenter une variabilité d'une année à l'autre et d'une décennie à l'autre, et ne sera pas uniforme d'une région à l'autre. Tous les modèles climatiques à grande échelle (MCGAO) prédisent une augmentation de la température moyenne mondiale de 2 à 6 °C d'ici la fin du XXI^e siècle, avec une forte variabilité interannuelle du climat (Giorgi, 2006). Cela qui favorisera la multiplication des événements climatiques extrêmes tels que les précipitations intenses, les sécheresses et les vagues de chaleur. La figure 6 présente l'évolution de la température et des incertitudes (valeur moyenne et écart-type) selon des scénarios SRES du CMIP3 et des RCP du CMIP5. Les chiffres entre parenthèses correspondent aux nombres de modèles utilisés (Knutti et Sedlacek, 2013).

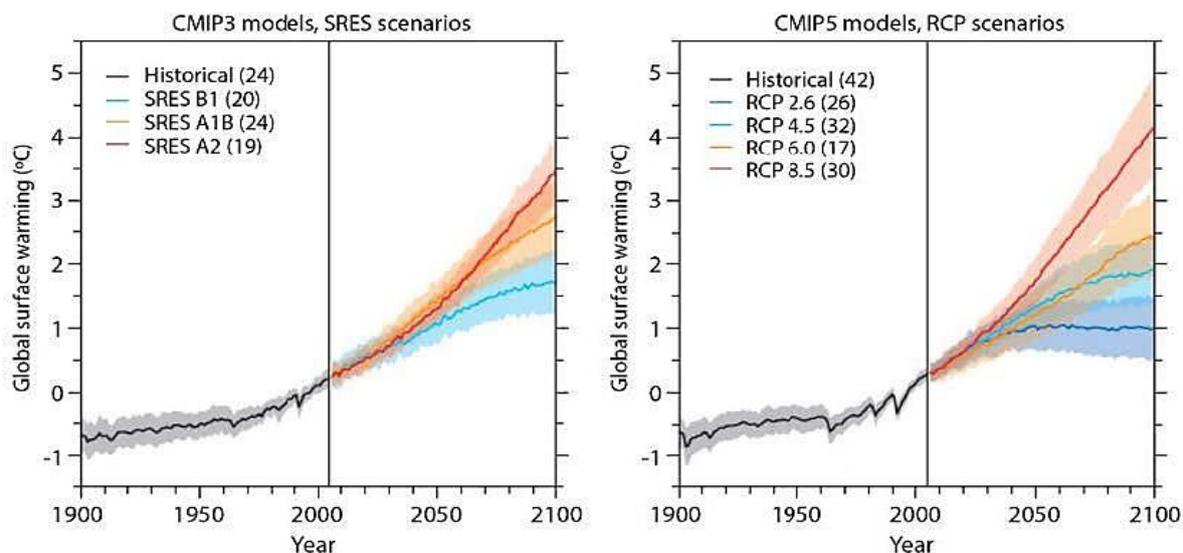


Figure 6 : Changement global des températures et incertitudes

Source : (Knutti & Sedláček, 2013)

Les études de Kouakou (2011) ont montré qu'à l'horizon 2031-2040, l'accroissement des températures en Côte d'Ivoire atteindra 0,8 °C. Cependant, cet accroissement varie selon les régions.

2.1.5.6. Impact du changement climatique sur les précipitations futures

La variation des précipitations sera affectée par l'augmentation de la chaleur atmosphérique, ce qui entraînera une plus grande quantité de vapeur d'eau, favorisant ainsi des précipitations plus intenses. Par ailleurs, ces phénomènes contribueront à l'accentuation des périodes de sécheresse dans certaines régions, en raison notamment d'une absorption accrue de l'eau par le sol et la végétation, comme observé par Amoussou *et al.* (2012). La diminution des précipitations est associée à une variabilité d'une année à l'autre, ce qui pourrait compromettre l'équilibre hydrologique du continent africain et perturber considérablement plusieurs secteurs économiques (Christensen *et al.*, 2007). Par contre, certains modèles prévoient des augmentations de précipitations et d'autres des diminutions (CEDEAO-CSAO, 2008). Il n'y a alors pas de consensus au niveau des précipitations. Certaines projections climatiques envisagent une hausse des précipitations tandis que d'autres prévoient une diminution. Ainsi, les variations des précipitations sont influencées par les MCGAO, les scénarios d'émission et les horizons temporels considérés (CEDEAO-CSAO, 2008).

En Côte d'Ivoire, les études effectuées par Goula *et al.* (2006) ont montré pour la zone de savane arborée et pré-forestière, une diminution de 1,33 % des précipitations avec le modèle GFD3

contre une hausse de 8,4 % avec le modèle UK89 à l'horizon 2075. Dans la zone de savane, le modèle GFD3 prédit une diminution de 1,33 % contre 0,56 % pour le modèle UK89.

2.2. Utilisation de la télédétection et du SIG pour la modélisation de l'évolution de l'occupation des sols et leur apport dans la gestion des ressources en eau

La télédétection représente une importante ressource de données pour étudier la diversité spatiotemporelle des éléments environnementaux. Elle offre la possibilité d'acquérir rapidement des données synthétiques pour repérer et surveiller de vastes zones géographiques, parfois inaccessibles par d'autres moyens. (Stow, 2004 ; Smith, 2012 ; Bersi, 2018). Elle est cruciale dans plusieurs applications telles que l'évaluation des dommages environnementaux, la reconnaissance globale, la création de produits cartographiques, le suivi de l'occupation des sols, la surveillance des rayonnements, la planification urbaine, l'évaluation des sols et l'évaluation du rendement des cultures, etc. La télédétection multispectrale fournit une quantité importante de données spectrales sur les caractéristiques de la surface terrestre, notamment pour classifier l'usage des sols et la végétation environnante (Landgrebe, 2002). D'autre part, la télédétection est capable de repérer et de suivre les modifications de l'occupation des sols et de la végétation à diverses échelles spatiales et temporelles (Stow, 2004). En même temps que la variété des utilisations de la télédétection, la demande en matière de volume et de précision des données sur l'occupation des sols devient de plus en plus importante (Rogan & Chen, 2004). Néanmoins, la production de ces données demeure une entreprise complexe en raison de divers facteurs, notamment la complexité du paysage, la sélection des données, le traitement d'images et les méthodes de classification. (Lu & Weng, 2007 ; Perumal & Bhaskaran, 2010).

Depuis les années 1980, avec l'avènement de la télédétection, un grand nombre d'études théoriques et pratiques ont été menées pour suivre les changements dans l'utilisation des sols. Les premiers capteurs terrestres, caractérisés par une résolution spatiale limitée (80 mètres pour Landsat MSS, 1,1 km pour NOAA/AVHRR), ont principalement facilité l'analyse des évolutions régionales des paysages agricoles (Dubreuil & Le Dû, 1997). À partir de la fin des années 1980, l'augmentation de la résolution des capteurs a facilité une évaluation plus précise de l'évolution de l'occupation des sols. Durant les quinze dernières années, la modélisation du changement de l'occupation des sols à l'échelle parcellaire est désormais réalisée par l'exploitation des images satellites à résolution spatiale élevée, comme celles fournies par Landsat ETM+ (30 mètres en multispectral), SPOT 5 (10 mètres en multispectral) ou Quickbird (0,61 mètres). En parallèle de ces avancées technologiques majeures, l'essor des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) a facilité la création de bases de données spatiales sur

l'occupation des sols. Ces bases permettent d'intégrer les données issues des images satellites dans des modèles de suivi, et plus récemment, des projections de l'occupation des sols (Franklin *et al.*, 2001 ; Rogan & Chen, 2004). De nombreux modèles ont été élaborés afin de générer des simulations sur l'évolution de l'occupation des sols (Briassoulis, 1999 ; Agarwal *et al.*, 2000). Toutefois, le choix d'un modèle adéquat pour la modélisation prédictive du changement de l'occupation des sols revêt une grande importance. En effet, cela requiert à la fois une compréhension approfondie des facteurs qui influencent les changements observés et la création de modèles valides et reproductibles (Corgne, 2004). Les modèles de l'évolution de l'occupation des sols doivent prendre en considération une variété de facteurs spatiaux et temporels. Par exemple, ils doivent intégrer l'interaction entre l'occupation des sols passée et divers facteurs tels que les éléments naturels, économiques, sociopolitiques (Seto & Fragkias, 2005). L'intégration de ces variables s'est révélée être un outil précieux dans la prédiction des changements futurs de l'occupation des sols (Luck & Wu, 2002).

2.2.1. Classification de l'occupation des sols

La détermination de l'occupation des sols par l'utilisation des images satellitaires peut être vue comme une synergie entre le traitement numérique des images et les méthodes de classification visant à analyser cette occupation (Bektat & Goksen, 2004). Le traitement des images cherche à améliorer leur qualité, tandis que la classification implique l'attribution des pixels de l'image à des catégories correspondant à différentes classes d'occupation des sols (Lu & Weng, 2007). Diverses méthodes sont disponibles, parmi lesquelles figurent l'analyse d'images et la reconnaissance de motifs. La qualité d'une classification repose sur la connaissance des données, des techniques de classification et sur l'expertise des analystes (Landgrebe, 2002 ; Smith, 2012). Par conséquent, le choix d'une méthode de classification optimale est crucial pour réussir une tâche spécifique, car aucune méthode ne peut être universellement efficace dans toutes les situations. Il convient de noter que chaque méthode est adaptée à certaines caractéristiques d'images et à des conditions spécifiques d'étude (Perumal & Bhaskaran, 2010). En effet, il y a deux fondamentales approches de classification : la classification non-supervisée et la classification supervisée.

2.2.1.1. Classification non supervisée

Cette approche est typiquement adoptée lorsque les données et la région d'étude sont peu documentées. Les résultats d'une classification ne sont significatifs que si les classes peuvent être interprétées de manière adéquate (Eastman, 2003 ; Richards & Jia, 2006). La classification non supervisée est réalisée automatiquement à l'aide d'algorithmes et de seuils radiométriques

pour identifier les groupes de pixels présentant des valeurs spectrales similaires. Cette méthode utilise généralement des techniques de regroupement pour identifier ces groupes. Ensuite, des catégories thématiques sont assignées aux groupes spectraux identifiés. La fiabilité des résultats obtenus avec cette approche repose uniquement sur les algorithmes des logiciels employés (Eastman, 2003 ; Babykalpana & Thanush, 2010). Toutefois, cette méthode offre également aux utilisateurs la possibilité de personnaliser certains paramètres afin de repérer des tendances statistiques propres aux données. Ces paramètres peuvent inclure le seuil du rayonnement, ainsi que le nombre minimal et maximal de classes. (Richards & Jia, 2006 ; Eastman, 2003 ; Xiong, 2002). L'un des principaux atouts de la classification non supervisée réside dans son caractère automatique. Elle permet de réduire le temps de calcul et fournit aussi des résultats totalement impartiaux.

2.2.1.2. Classification supervisée

Cette approche est couramment utilisée comme méthode principale pour l'analyse quantitative des données de télédétection. Elle implique l'identification de zones relativement homogènes sur l'image, qui représentent les thèmes à distinguer. Les propriétés spectrales de ces surfaces sont employées comme repères pour catégoriser toute l'image en utilisant des algorithmes de classification adaptés (Richards & Jia, 2006). Dans la classification supervisée, l'utilisateur peut sélectionner les pixels échantillons de chaque classe dans une image, ces échantillons servant de référence pour classer les autres pixels de l'image (Eastman, 2003). Ce qui fait la force de cette méthode, c'est sa capacité à intégrer les connaissances humaines dans le processus de classification, offrant ainsi une plus grande flexibilité pour améliorer les résultats. Malgré ses avantages, cette approche présente quelques inconvénients : elle nécessite une intervention humaine substantielle, et la précision des résultats est étroitement liée à l'expertise des individus effectuant la classification. Dans le cadre de la classification supervisée, la précision des résultats dépend fortement de l'algorithme utilisé, étant donné qu'il existe plusieurs algorithmes disponibles, chacun pouvant produire des résultats finaux différents.

2.2.2. Modèle de prédiction de l'occupation des sols

Diverses catégories de modèles ont été appliquées pour la prédiction de l'occupation des sols, incluant des approches mathématiques, statistiques, évolutives (comme les systèmes multi-agents) et cellulaires (tel que les automates cellulaires) (Hubert-Moy, 2006), ainsi que des modèles basés sur une méthode dite "approximative". En outre, les modèles fondés sur la théorie de chaîne de Markov ou des modèles experts ont été largement utilisés (Okwuashi *et al.*, 2012 ; Hepinstall *et al.*, 2008 ; Hubert-Moy., 2006). Dans une synthèse non exhaustive, Parker et ses

collègues (2003) identifient sept principales catégories de modèles, qui peuvent se chevaucher, comprenant des modèles mathématiques fondés sur une ou plusieurs équations qui recherchent une solution d'équilibre ; les modèles systémiques, ceux fondés sur des techniques statistiques telles que des régressions ; les modèles experts ; les modèles d'évolution reposant sur les réseaux neuronaux ; les modèles cellulaires qui comprennent les automates cellulaires et les champs de Markov, et les modèles multi-agents. Enfin, certains modèles sont qualifiés d'hybrides car ils fusionnent deux ou plusieurs de ces catégories de modèles (Corgne, 2004). Durant les deux dernières décennies, des modèles tels que la chaîne de Markov, CA-Markov, GEOMOD et LCM (Land Change Modeler) ont été reconnus pour leur efficacité dans la prévision des changements dans l'occupation des sols. Ils exploitent les systèmes d'information géographique (SIG) pour analyser les données, simuler les probabilités de changement, et ainsi accroître la précision des prévisions (Eastman, 2006 ; Pontius & Cheuk, 2006). Par conséquent, pour déterminer un modèle approprié qui peut être appliqué au bassin versant du Haut Bandama à Badikaha, nous allons passer en revue brièvement les principaux modèles proposés.

2.2.2.1. Modèle GEOMOD

GEOMOD est un modèle de simulation qui représente la distribution spatiale des évolutions dans l'utilisation des terres, qu'elles soient antérieures ou à venir. Il modélise les passages entre deux types d'utilisation des terres, identifiés par les notations 1 et 2 (Silva & Clarke, 2002 ; Pontius *et al.*, 2001 ; Pontius & Cheuk, 2006). Par exemple, il pourrait servir à anticiper la transition entre deux catégories, telles que les zones forestières et non forestières, passant de l'état 1 à l'état 2 (Dushku & Brown, 2003).

2.2.2.2. Module Markov : Analyse de la chaîne de Markov

Le module MARKOV examine une paire d'images et génère une matrice de probabilité de transition, une matrice des zones de transition, ainsi qu'un ensemble d'images de probabilité conditionnelle en sortie (Eastman, 2006 ; Eşbah *et al.*, 2011) :

- La matrice de probabilité de transition est un fichier texte qui enregistre les chances qu'une catégorie d'occupation des sols se transforme en d'autres catégories. Dans cette matrice, les lignes détaillent les catégories d'occupation des sols précédentes, tandis que les colonnes représentent les catégories les plus récentes ;
- La matrice des zones de transition est un document texte qui enregistre le nombre de pixels prévus pour passer d'une catégorie à une autre pendant une période spécifique. Dans cette matrice, les lignes et les colonnes fournissent également des descriptions des anciennes catégories d'occupation des sols et des catégories les plus récentes ;

- Les images de probabilité conditionnelle fournissent la probabilité qu'un type d'occupation des sols soit présent dans chaque pixel pendant la période de transition.

Ces images sont ensuite exploitées pour créer une carte prédictive de l'occupation des sols.

2.2.2.3. Modèle LCM (Land Change Modeler)

Selon Pontius & Cheuk (2006), à la fois Markov et le LCM peuvent simuler les changements impliquant plusieurs catégories simultanément. Le module LCM permet d'évaluer avec précision chaque étape du processus de simulation et de choisir l'algorithme le plus adapté selon l'objectif initial. Actuellement, il est largement utilisé comme outil de modélisation. Bien qu'il demeure expérimental, ce modèle présente un fort potentiel et peut s'intégrer aux réseaux neuronaux, générant des résultats d'une précision supérieure à 70% (Islam & Ahmed, 2011). Pour les simulations à court, moyen et long terme de l'évolution de l'occupation des sols dans le BVHBKB, l'objectif est de modéliser plusieurs catégories simultanément avec une précision globale acceptable.

2.2.3. Apport des SIG dans la gestion des ressources en eau

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) englobent à la fois des données spatialement référencées (géoréférencées), organisées de manière à permettre l'extraction d'informations pertinentes pour la prise de décision, ainsi que les logiciels spécialisés dans la gestion et le traitement de ces bases de données (Savané, 1997). Ces données peuvent se présenter sous deux formes : pixels ou rasters et vecteurs (Kouamé, 2003). La restitution de ces données est généralement en deux dimensions. Toutefois, une restitution en 3D présentant des variations temporelles sur un territoire est possible.

L'aptitude des SIG à stocker, partager, consulter, superposer et fusionner les couches les informations thématiques diverses présentes sur un même territoire améliore la perception du réel et permet d'avoir plusieurs perspectives (Kouamé, 2003). En effet, les domaines d'application des SIG sont extrêmement variés. Ils vont de la géographie à la téléphonie, en passant par l'hydrogéologie, l'hydrologie, le gaz, la géologie, l'archéologie, la finance, la sécurité, la biologie, la santé, le transport, le sport ou encore la météorologie (ESRI, 2014). En Côte d'Ivoire, les SIG ont beaucoup été utilisés dans la protection des eaux souterraines par plusieurs auteurs dont Saley (2003), Kouamé (2007), Kouassi *et al.*, (2007), Youan (2008), Adja, (2009), UNICEF, (2009), Aké (2010), dans la gestion des eaux surfaciques par Anoh *et al.*, (2012), Eba *et al.*, (2013), Koua (2014) et Anoh, (2014).

2.3. Modélisation hydrologique et hydraulique

Un modèle est un outil numérique servant à faire la représentation simplifiée d'un processus ou d'un système dont le but est de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir. Les domaines d'applications des modèles sont très variés (Renaud, 2004). L'objectif des modèles est de simplifier la compréhension de phénomènes souvent complexes afin de prédire et de recommander des mesures pour atténuer les effets indésirables qu'ils engendrent (Renaud, 2004). En hydrologie, le modèle simule la réponse d'un bassin versant, en termes de débit, à une sollicitation d'entrée que sont les précipitations. Une fois le modèle calibré sur un scénario de référence, la simulation de scénarios d'évolution permet de simuler l'impact de la modification de certaines données sur un objet (dans cette étude, l'impact de la dynamique de l'occupation des terres, des différents usages de la ressource en eau, sur la disponibilité de la ressource en eau). Il est également fréquent d'utiliser la modélisation afin de prévoir certains phénomènes ou encore pour reconstituer des séries de débits dans le cadre de dimensionnement d'ouvrages (construction de ponts, déversoir de sécurité de barrages...) mais aussi pour délimiter des zones inondables (Nghiem, 2014).

Ces modèles faciliteront l'élaboration de scénarios qui guideront les décisions des parties prenantes impliquées dans des projets d'aménagement du territoire ou de promotion de pratiques agro-environnementales. La modélisation hydrologique est un processus qui vise à représenter mathématiquement et informatiquement le cycle de l'eau dans un bassin versant ou une zone géographique spécifique. Elle implique la création d'un modèle mathématique qui simule le comportement des différents composants du système hydrologique, tels que les précipitations, l'évaporation, l'infiltration, le ruissellement, la circulation des eaux souterraines, et la décharge des cours d'eau.

2.3.1. Classification des différents types de modèles hydrologiques

2.3.1.1. Classification selon la représentation du processus

Effectivement, la classification des modèles hydrologiques peut se faire selon divers critères, notamment en fonction des descriptions des processus ou de l'échelle spatiale et temporelle. La classification proposée par Refsgaard et Storm (1995) divise les modèles hydrologiques en trois grandes catégories :

- Les modèles empiriques sont développés à partir d'expériences en laboratoire ou sur le terrain en utilisant des formules mathématiques simples (GR4J, GRP, etc.).
- Les modèles conceptuels, où le bassin est représenté par une analogie, un concept, considèrent le bassin versant comme un ensemble de réservoirs interconnectés

(représentant les différents compartiments hydrologiques) dont les niveaux augmentent et diminuent au cours du temps et dont le débit de vidange dépend du taux de remplissage (GRP, etc.).

- Les modèles distribués à base physique représentent les processus en utilisant des lois physiques les régissant (CEQUEAU, SWAT, etc.).

2.3.1.2. Classification selon la discrétisation temporelle

La plupart des modèles hydrologiques convertissent les précipitations en débit avec une résolution temporelle journalière, ce qui nécessite des données d'entrée également disponibles à cette fréquence. Il y a aussi des modèles conçus pour traiter des intervalles de temps plus étendus, comme les échelles mensuelles ou annuelles, alors que d'autres à des pas de temps plus faibles (infra-journaliers à infra-horaires). Selon les objectifs recherchés, le comportement du bassin versant peut-être reproduit uniquement pour des événements particuliers sur une période plus ou moins longue grâce aux modèles continus.

- Les modèles événementiels reproduisent la réponse du bassin lors d'un épisode pluvieux. Ce modèle, activé uniquement lorsqu'il y a des précipitations, nécessite la capacité de définir l'état initial du bassin en fonction des conditions préexistantes (MARINE, etc.).
- Les modèles continus permettent de suivre l'évolution des paramètres d'état et/ou de sortie à plus long terme. Ces modèles n'englobent pas que des périodes de précipitations et c'est pour cela que certains phénomènes ne peuvent être négligés (en particulier l'évapotranspiration par exemple, qui est liée aux conditions météorologiques). Ainsi, pour expliquer la variation des réserves d'eau dans le bassin versant sur une ou plusieurs années hydrologiques, ces modèles exigent l'incorporation de variables de conditions aux limites supplémentaires telles que les précipitations, la température, le rayonnement solaire, le vent, etc., par rapport aux modèles événementiels (CEQUEAU, SWAT, etc.).

2.3.1.3. Classification selon la représentation de l'espace

Dans un modèle global (ou boîte noire) le bassin est considéré comme une entité unique.

Le modèle ne prend donc pas en compte la variabilité spatiale des paramètres régissant les phénomènes comme le ruissellement, l'érosion ou l'occupation des sols. Il utilise des relations mathématiques simples.

Certains modèles qui entrent dans cette catégorie sont les modèles de type GR (Génie Rural) tels que GR3, GR4J (Varado, 2004), le modèle SSARR (Speers, 1995), le modèle GARDENIA (Perrin, 2002) et le HEC-1 (Hydrologic Engineering Center, 1998). Ces modèles adoptent une

approche globale en considérant le bassin versant comme une unité homogène, ce qui peut entraîner une simplification des processus hydrologiques pour représenter le comportement global du système sans tenir compte des variations spatiales internes.

Les modèles distribués quant à eux représentent, à l'aide de formules mathématiques plus complexes, la variabilité spatiale des phénomènes agissant sur le bassin.

La plupart du temps, le modèle n'est pas entièrement distribué, car certains éléments peuvent être globalisés pour simplifier. On qualifie alors ce modèle de semi-distribué (Formal, 2020). Selon le degré de détail des processus, le modèle peut être déterministe, stochastique ou une combinaison des deux. Dans un modèle déterministe, les variables d'entrée et les paramètres du système sont supposés être parfaitement déterminés ou déterminables. En revanche, dans un modèle stochastique, ce sont plutôt des distributions de probabilité qui sont attribuées aux grandeurs. La majorité des modèles sont déterministes. L'approche probabiliste est utilisée soit parce que le phénomène étudié est aléatoire ou difficilement explicitable physiquement (Formal, 2020). Dans cette catégorie, plusieurs modèles peuvent être classés : SIM, TOPMODEL, HYDROTEL, MARTHE, HEC-HMS, HEC-RAS, MIKE-SHE, MIKE21, MODCOU, TOPKAPI, SWAT, CLSM, EROS, SOPHIE etc. Le modèle distribué utilisé dans cette étude est le modèle Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

2.3.1.4. Fonctionnement des modèles hydrologiques semi-distribués

Les modèles hydrologiques semi-distribués (tel que SWAT) permettent au modélisateur de s'appuyer sur une large communauté d'utilisateurs à travers les forums qui lui sont dédiés.

Dans son exécution, les modèles hydrologiques subdivisent la modélisation hydrologique du bassin en deux phases (Neitsch *et al.*, 2005). La phase initiale représente la composante terrestre du cycle hydrologique. Dans cette phase, le modèle gère la quantité d'eau, les charges de sédiments, de nutriments et de pesticides déversés dans le canal principal de chaque sous bassin. La phase suivante implique le transport aquatique, c'est-à-dire le déplacement de l'eau, des nutriments, des sédiments et autres polluants à travers le réseau fluvial du bassin jusqu'à son débouché.

2.3.1.5. Phase terrestre des modèles hydrologique (bilan hydrologique)

Les modèles hydrologiques expriment la conservation de l'eau dans un système hydrologique donné (bassin versant, lac, aquifère, etc.) sur une période définie. Il se basent sur le principe fondamental appelé bilan hydrologique selon lequel l'eau entrant dans un système doit être égale à la somme des pertes et des variations de stockage. Ainsi, Le bilan hydrologique est une méthode qui permet de quantifier les flux d'eau entrant, sortant et

stocké dans un système hydrologique (tel qu'un bassin versant, un lac, un aquifère ou un réservoir). Il repose sur le principe de conservation de la masse. L'équation du bilan hydrologique est donnée par :

$$P - ET - R - \Delta S = 0$$

où :

- P : Précipitation – principal apport d'eau au système (pluie, neige, grêle, etc.).
- ET : Évapotranspiration, combinaison de l'eau perdue par évaporation et transpiration des végétaux.
- R : Ruissellement, eau s'écoulant à la surface ou infiltrant pour rejoindre les nappes phréatiques ou les cours d'eau.
- ΔS : Variation de stockage, changement dans la quantité d'eau stockée dans le sol, les réservoirs ou les aquifères.

2.3.1.6. Infiltration

Lorsque la pluie tombe, elle peut être retenue soit par le couvert végétal soit par la surface du sol. L'eau retenue à la surface du sol va s'infiltrer dans les couches du sol et l'excédent va ruisseler. L'eau qui s'infiltré peut demeurer dans le sol, puis s'évaporer ultérieurement ou se joindre à l'écoulement de surface grâce aux eaux souterraines. Les modèles hydrologiques tiennent compte de la diversité des horizons de sol traversés par l'eau infiltrée. Ils divisent à cet effet le profil du sol en trois niveaux.

Dans chaque horizon du sol, l'infiltration de l'eau est fonction de sa profondeur, sa conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}), sa réserve utile (humidité à la capacité au champ (FC_{ly}) à laquelle est retranchée l'humidité au point de flétrissement permanent (SW_{PFP})), sa densité apparente et son contenu en argile dans laquelle l'humidité au point de flétrissement permanent est fonction de la densité apparente et du contenu en argile. La quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol est l'excédent de la précipitation totale journalière après le retrait de la partie ruisselée (Lévesque *et al.*, 2008) et de celle de la capacité au champ (Chaponnière, 2005).

Au-delà de la zone racinaire, l'eau va s'infiltrer à travers les fentes puis au sein de la zone vadose pour ultimement recharger la nappe de surface et la nappe profonde. Ainsi, servant de transition entre le profil de sol et les nappes souterraines, la zone vadose (2 à 20 m) va retenir une certaine quantité d'eau suite à une remontée capillaire de l'eau de la nappe superficielle. Elle retarde par conséquent, l'acheminement de la recharge vers les nappes (Neitsch *et al.*,

2011). Le délai pendant lequel l'eau sort du profil de sol pour alimenter la nappe libre dépend de la profondeur, du niveau piézométrique et des propriétés hydrauliques de la zone vadose.

Les échanges verticaux se terminent dans le profil du sol lorsque l'eau atteint le système d'écoulement souterrain. Ce dernier est constitué d'une nappe libre aussi appelée nappe de surface et d'une nappe profonde correspondant aux couches dont les profondeurs sont supérieures à 20 m (Neitsch *et al.*, 2005). La nappe libre contribue à l'alimentation de la nappe profonde jusqu'à la couche imperméable (Lévesque *et al.*, 2008). Elle permet aussi de combler le déficit en eau de la zone racinaire. Ce processus dans SWAT est appelé « revap » (Neitsch *et al.*, 2011). La nappe libre contribue aussi à l'écoulement de base du cours d'eau principal et de ses tributaires au sein du bassin. Toutefois, cet écoulement de base dans les tributaires ne se produit que si la quantité d'eau stockée dans la nappe dépasse un certain seuil. Neitsch *et al.* (2011), résumant le processus de percolation de l'eau à travers l'équation 2 :

$$W_{perc} = (SW_{ly} - FC_{ly}) * (1 - \exp\left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right]) \quad (\text{Équation 1})$$

avec :

W_{perc} = quantité d'eau percolant les couches de sol sur le jour donné (mm) ;

SW_{ly} = contenu d'eau dans le sol sur un jour donné (mm) ;

FC_{ly} = capacité au champ ;

Δt = pas de temps (h) ;

TT_{perc} = durée de la percolation (h).

La durée de la percolation « TT_{perc} » peut être déduite à partir du rapport de la différence entre humidité à saturation « SAT_{ly} » et humidité à la capacité au champ « FC_{ly} » sur la conductivité hydraulique à saturation du sol « K_{sat} ».

2.3.1.7. Évapotranspiration

Une partie de l'eau tombée après une pluie va encore retourner dans l'atmosphère. Ce retour de l'eau dans l'atmosphère se fait par évaporation de l'eau demeurée en surface, sur les toits, dans le réservoir du sol et par transpiration des végétaux (Neitsch *et al.*, 2002, 2005 ; Chaponnière, 2005). L'ensemble de ces processus de retour de l'eau est appelé évapotranspiration (ETP). Cette ETP est conditionnée par la demande évaporatoire de l'atmosphère et l'état hydrique du sol. Les modèles hydrologiques proposent trois options (Equations 3, 4 et 5) pour calculer l'évapotranspiration potentielle (Biesbrouck *et al.*, 2002) comme suit ;

- équation de Penman-Monteith : $\lambda E_0 = \frac{\Delta \times (H_{net} - G) + \rho_{air} \times C_p \times [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \times (1 + \frac{r_c}{r_a})}$ (Equation 2)

- équation de Priestley-Taylor : $\lambda E_0 = \alpha_{pet} \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times (H_{net} - G)$ (Equation 3)

- équation Hargreaves : $\lambda E_0 = 0,0023 \times H_0 \times (T_{mx} - T_{mn})^{0,5} \times (T_{av} + 17,8)$ (Equation 4)

Ici, λ correspond à la densité du flux de la chaleur latente de vaporisation (MJ/m².j) ;

E_0 , l'évaporation transpiration potentielle (ETP) (mm/j) ;

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

H_{net} est le rayonnement net (MJ/m².j) ; G est le flux de chaleur dans le sol (MJ/m².j) ; ρ_{air} est la masse volumique de l'air (kg/m³) ;

C_p , la chaleur spécifique à pression constante (MJ/kg.°C) ; γ , la constante psychrométrique (kPa.°C) ;

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

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

r_c est la résistance du feuillage de la plante (s/m) ;

H_0 correspond au rayonnement incident (MJ/m².j) ;

T_{mx} , T_{mn} et T_{av} , les températures maximales, minimales et moyennes du jour (°C) ;

α_{pet} est un coefficient et r_a est la résistance de la diffusion de l'air (résistance aérodynamique).

L'utilisation de l'une de ces méthodes dans les modèles hydrologiques est fonction des données disponibles et du types de modèle. L'équation de Hargreaves, celle utilisée dans cette étude, n'utilise que les valeurs de pluie et de température pour déduire l'ETP.

2.3.1.8. Ruissellement de surface

Le ruissellement de surface survient lorsque la quantité de pluie tombée à la surface terrestre dépasse le taux d'infiltration (Neitsch *et al.*, 2002). Elle se produit lorsque les échanges verticaux sont satisfaits et que la précipitation perdure. Les modèles hydrologiques tel que SWAT offrent deux approches pour estimer le ruissellement de surface : l'approche de Green et Ampt ainsi que celle du Number Curve (CN) (Biesbrouck *et al.*, 2002).

L'équation de Green et Ampt est fondée sur la loi des masses. Elle a été développée pour prédire l'infiltration en admettant qu'à tout temps, l'excès d'eau figure à la surface du sol. Leur équation suppose que le profil du sol est homogène et l'humidité antérieure est uniformément distribuée dans le profil du sol. Il divise ainsi l'infiltration en deux phases (Chaponnière, 2005). Dans la première phase, l'eau est en flaque et l'infiltration sera égale au taux de précipitation. Dans la seconde phase, l'eau est sous l'effet piston de la flaque formée en surface et l'infiltration

sera fonction de la conductivité hydraulique effective, de la succion au front d'humectation, de la porosité du sol et de la quantité d'eau déjà infiltrée (Neitsch *et al.*, 2005). Sa mise en place requière des données horaires.

Le CN est une fonction dépendant de la perméabilité du sol, de l'occupation des sols et des conditions antérieures de la teneur en eau du sol (Neitsch *et al.*, 2005). Elle calcule le ruissellement de surface en soustrayant aux précipitations, la lame d'eau infiltrée. Neitsch *et al.* (2011) ont défini des abaques du CN en fonction de la pluie, de la perméabilité du sol, de l'utilisation du sol et des conditions antérieures d'humidité. Ainsi, suivant la valeur du CN, le ruissellement de surface peut être déduit. Ce ruissellement de surface atteint le cours d'eau suivant le temps de concentration du sous bassin. Pour chaque sous bassin, ce temps est évalué en faisant la somme du temps nécessaire au flux d'eau pour atteindre et parcourir le cours d'eau. Le temps pour atteindre le cours d'eau est calculé en fonction de la pente moyenne, de la longueur de cette dernière et du coefficient de rugosité de Manning de la surface du sol. Quant au temps de parcours du cours d'eau, il est déterminé en fonction de la longueur du cours d'eau, de la pente du cours d'eau, de la superficie du bassin et du coefficient de rugosité de Manning (Neitsch *et al.*, 2002 ; Chaponnière, 2005).

Bien que le ruissellement de surface soit le moyen d'alimentation primaire des cours d'eau, le modèle inclut les ruissellements de subsurface et les ruissellements souterrains de l'aquifère superficiel (débit de base) dans son calcul.

2.3.2. Modélisation des écoulements à surface libre et de la propagation des crues

L'insuffisance de la production de la canne à sucre n'est certainement pas le seul fait de paramètres climatiques. Elle pourrait être liée également aux inondations des parcelles de cannes à sucre. En effet, les complexes sucriers de Ferkessédougou sont situés le long du fleuve Bandama et son affluent Lokpoho (Figure 7) qui en période de crue, inondent les terres environnantes. La canne à sucre a besoin d'eau pour son développement. Cependant, à un stade de son développement (la maturation), un apport excessif d'eau ou inondation réduit le taux de sucre dans les tiges de canne. La simulation des pluies extrêmes et de la propagation des crues du fleuve Bandama Blanc à différentes période de retour dans le complexe sucrier de Ferkessédougou permet de déterminer les zones inondables et par conséquent les parcelles susceptibles d'être inondées lors des extrêmes hydrologiques et/ou pluviométriques.

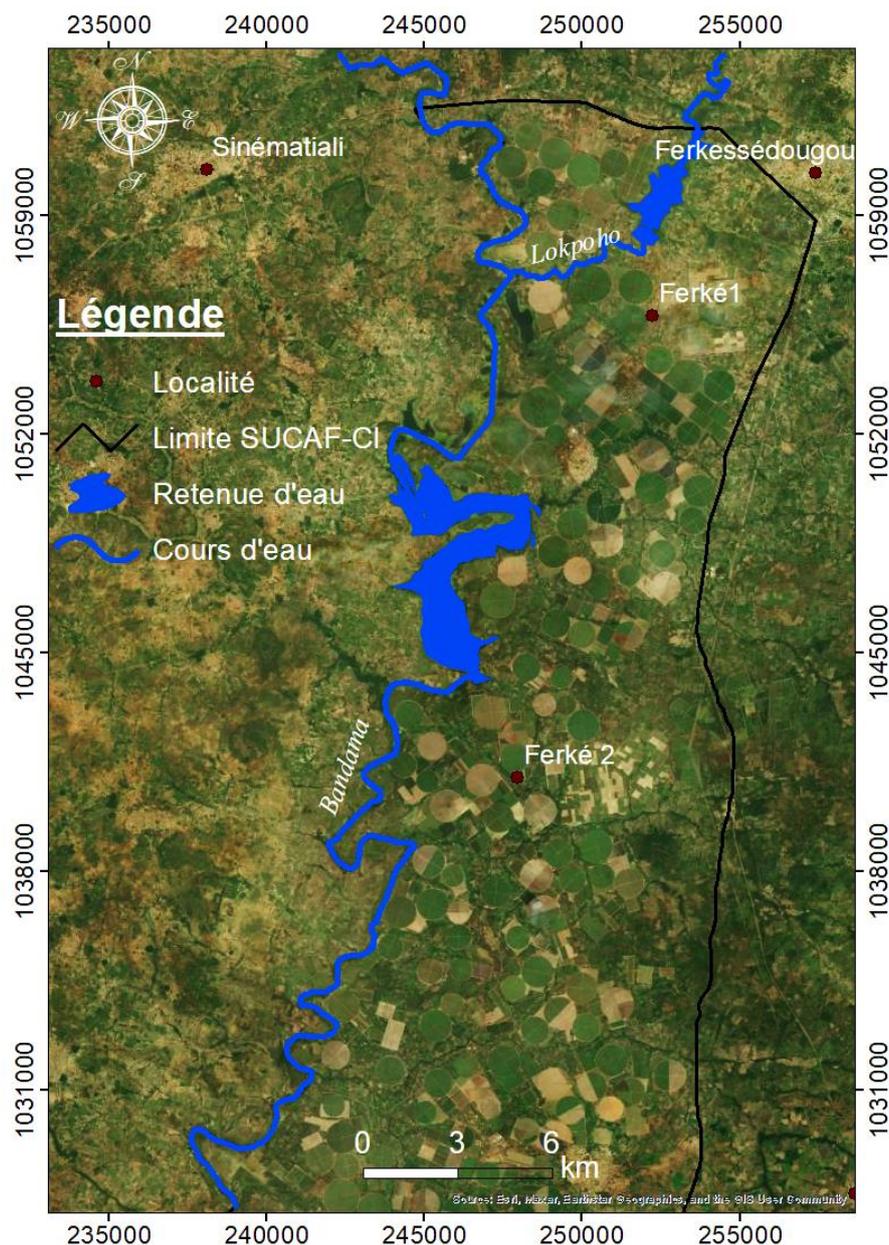


Figure 7 : Carte des complexes sucriers de Ferkessédougou le long du fleuve Bandama

Les modèles hydrodynamiques peuvent aider à explorer les décisions alternatives et diverses conditions pour éclairer les décisions relatives aux crues et aux inondations ainsi que celles en matière de restauration de l'environnement. En fournissant l'étendue, la durée et la profondeur de l'inondation à l'intérieur de multiples occupations du sol, ces modèles peuvent simuler les effets des projets de restauration planifiés et des conceptions de projets proposées et des opérations. Pour cette thèse, un modèle numérique est utilisé pour résoudre les équations hydrodynamiques sous-jacentes pour les flux bidimensionnels. Les équations de base pour l'écoulement bidimensionnel sont la moyenne en profondeur « équations en eau peu profonde » aussi connues sous le nom « d'équations de Saint-Venant » dans leur forme unidimensionnelle

et bidimensionnelle (Brou, 2019). Ce chapitre présente une brève analyse documentaire des modèles, de leurs types et de leurs hypothèses de base.

- Données d'entrée du modèle HEC-CRAS

Les données d'entrée du modèle sont :

- un modèle numérique de terrain de 30 mètres de résolution ;
- une chronique de données de débits sur les périodes sèches et humides et des hauteurs de 5 et 10 jours consécutives de pluie choisie en raison de leur apparition fréquente par rapport aux autres séquences de pluies observées ;
- un coefficient de Manning-Strickler de 0,05 est retenu. Cette valeur est fonction des particules de sol, de l'irrégularité du lit, de la présence ou de l'absence de végétation dans le lit et de la morphologie du cours d'eau (méandrique ou non) (Koussi *et al.*, 2019).

2.3.2.1. Principe de base de l'hydraulique

Les équations de l'hydraulique sont tirées du principe de la conservation de différentes grandeurs (Archambeau, 2006). Le plus évident est probablement celui de la conservation de la masse. La conservation de la quantité de mouvement et celle de l'énergie totale viennent ensuite. Vu l'hypothèse de l'incompressibilité de l'eau, cette dernière relation se simplifie en une équation de transport de la température dont nous ne tiendrons pas compte dans ce travail (Hirsch, 2007).

2.3.2.2. Conservation de la masse

La forme globale de la conservation de la masse s'exprime par l'équation 6 :

$$\iiint_{\Omega_F} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\Omega_F = 0 \quad (\text{Équation 5})$$

avec, Ω_F : un domaine matériel qui suit le fluide en mouvement ; ρ : masse volumique du fluide. Si on fixe le volume de discrétisation dans l'espace, on se trouve dans le cas d'un domaine géométrique et l'équation peut s'écrire sous la forme suivante en utilisant le théorème de la divergence de Green (Équation 7) :

$$\iiint_{\Omega_F} \frac{\partial \rho}{\partial t} d\Omega_F = \iint_{S_F} \rho \vec{u} \cdot \vec{n} dS_F \quad (\text{Équation 6})$$

avec, S_F : la superficie du domaine Ω_F , \vec{u} : le vecteur vitesse de composantes (u, v, w), \vec{n} : la normale à la facette du volume considéré.

Cette équation signifiant que la variation de la masse dans l'élément de volume considéré ne dépend que des bilans de flux sur ses faces.

L'eau étant un fluide newtonien incompressible, la variation temporelle de la masse volumique est nulle.

2.3.2.3. Conservation de la quantité de mouvement

Le second principe de conservation est celui de la quantité de mouvement, qui peut être exprimé comme suit (équation 8) :

$$\frac{d}{dt} \iiint_{\Omega_F} \rho \vec{u} d\Omega_F = \iiint_{\Omega_F} \rho \vec{F} d\Omega_F + \iint_{S_F} \vec{T} dS_F \quad (\text{Équation 7})$$

Avec, \vec{F} comme forces de volume et \vec{T} étant les forces de surface. Les forces de volume regroupent les forces de gravité, les forces centrifuges, les forces de Coriolis et les forces électromagnétiques. Dans le cadre de cette étude seules les forces de gravité ont été considérées, l'amplitude des autres forces étant négligeable dans les applications envisagées (Archambeau, 2006). Les forces surfaciques quant à elles comprennent la pression et les tensions visqueuses. Elles peuvent s'écrire de façon générale sous la forme suivante (Équation 9) :

$$T = (\tau_{ik} - p\delta_{ik})n_k \quad (\text{Équation 8})$$

avec, τ_{ik} : illustrant le tenseur des tensions visqueuses ;

p : la pression hydrostatique ;

δ_{ik} : le symbole de Kronecker qui traduit le fait que la pression est toujours normale à la surface considérée ;

n_k : les composantes selon les 3 axes de la normale à la surface considérée.

L'hypothèse de Stokes (Stokes, 1845), appliquée au fluide permet de relier les contraintes visqueuses, ou de cisaillement, au champ de vitesses (Équation 10) :

$$\tau_{ik} = \rho\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \quad (\text{Équation 9})$$

où ν est la viscosité cinématique (10^{-6} m²/s pour l'eau). L'introduction de l'équation 10 dans l'équation 9 permet d'obtenir aisément ; après utilisation du théorème de Green, les expressions générales suivantes de la conservation de la quantité de mouvement (Équation 11) :

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i \vec{u}) = \rho F - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} \quad (\text{Équation 10})$$

➤ Équations d'écoulement mises en jeu

Ces équations correspondent à la résolution des équations de Saint-Venant (2D) en deux directions (x ; y) en régime permanent et non permanent (HEC-RAS, 2016).

- Cas du régime permanent

Pour la simulation de la dynamique du cours d'eau à différentes périodes de retour les paramètres hydrologiques ne sont pas fonction du temps. Les équations mises en jeux sont :

- Equation de la conservation de la masse (Équation 12) :

$$\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (\text{Équation 11})$$

Où :

u et v sont les termes de vitesse respectivement selon x et y et q est un terme de flux tributaire.

- Équation de continuité

Sous forme vectorielle, elle prend la forme suivante (Équation 13) :

$$\nabla \cdot hV + q = 0 \quad (\text{Équation 12})$$

Où :

$V = (u, v)$: vecteur vitesse ;

et (∇) : vecteur des opérateurs dérivés partiels donnés par $(\nabla) = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right)$.

- Équations des moments

Elles s'écrivent comme suit (Équation 14 et 15):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (\text{Équation 13})$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (\text{Équation 14})$$

Où :

u et v sont les vitesses dans les directions cartésiennes,

g : accélération gravitationnelle ;

v_t : coefficient de viscosité tourbillonnaire horizontale ;

c_f : coefficient de frottement du fond ;

f : est le paramètre de Coriolis.

- Cas du régime non permanent

Les équations se présentent comme suit :

- Equation de la conservation de la masse :

En supposant que le flux est incompressible, la forme différentielle instable de l'équation de conservation de masse (continuité) est (Équation 16) :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (\text{Équation 15})$$

Où :

t = temps, u et v sont des termes de vitesse respectivement selon les axes x et y et q est une composante du flux tributaire. Sous forme vectorielle, l'équation de continuité prend la forme (Équation 17) :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q = 0 \quad (\text{Équation 16})$$

Où :

$V = (u, v)$ est le vecteur vitesse et l'opérateur différentiel

(∇) : est le vecteur des opérateurs dérivés partiels donnés par $(\nabla) = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$.

- Équation des moments

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (\text{Équation 17})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (\text{Équation 18})$$

Où :

u et v : les vitesses selon les directions cartésiennes, g : accélération gravitationnelle, v_t : coefficient de viscosité tourbillonnaire horizontale, c_f : coefficient de frottement du fond, f : paramètre de Coriolis.

2.4. Cycle végétatif de la canne à sucre

La culture de la canne à sucre vise principalement à exploiter le jus sucré contenu dans ses tiges pour produire du saccharose ou du sucre cristallisable. Parfois consommée directement comme aliment, elle est également cultivée occasionnellement comme plante fourragère pour une utilisation en vert ensilage.

D'après Doorenbos & Kassam (1980), la reproduction de la canne à sucre se réalise par le biais de boutures, et comprend les étapes successives suivantes :

- Phase d'émergence : les premières pousses apparaissent généralement entre 2 et 4 semaines après la plantation des boutures.
- Phase de croissance : cette période s'étend sur environ 5 à 7 mois. À la fin de cette phase, la croissance des tiges se stabilise et l'inflorescence se développe. Cette étape prédomine pendant les périodes chaudes et pluvieuses.

- Phase de maturation : elle intervient en moyenne 6 mois après l'arrêt de la croissance, pendant une période froide et peu pluvieuse.
- Fin du premier cycle : selon le moment de la plantation, la coupe peut être réalisée entre le 12ème et le 14ème mois suivant la plantation, marquant ainsi la fin du premier cycle.
- Premières repousses : les premières repousses connaissent ensuite des phases de croissance et de maturation d'une durée d'environ 12 à 14 mois après la coupe des cannes vierges.
- Coupe des premières repousses : la coupe des premières repousses se fait entre 24 et 30 mois après la plantation des boutures, marquant ainsi la fin du deuxième cycle. Par la suite, la coupe des repousses se fait tous les 12 à 13 mois environ.

Si les conditions environnementales sont propices, le cycle de croissance de la canne à sucre peut s'étendre sur plusieurs années. Cependant, pour des raisons de rentabilité, il n'est pas judicieux de conserver les mêmes plants indéfiniment. Ainsi, le cycle de culture est généralement de 5 à 7 ans en moyenne. Les attaques de cigales contraignent également les cultivateurs à limiter le nombre de repousses à 3 ou 4 après la récolte des cannes vierges.

2.5. Climat écologique de la canne à sucre

Le développement de la canne à sucre est étroitement lié aux conditions climatiques, qui jouent un rôle déterminant dans son cycle de croissance et de maturation. L'eau et la chaleur favorisent sa croissance, tandis que la sécheresse et le froid, surtout pendant la nuit, stimulent sa maturation. Ces éléments sont définis comme suit (Doorenbos & Kassam, 1980) :

- Besoins en chaleur : les températures idéales pour la germination se situent entre 26°C et 33°C et entre 28°C et 35°C pendant la phase de croissance dans la journée. La température minimale requise pour la croissance varie de 15°C à 18°C, et toute température inférieure à 0°C peut être létale pour la plante.
- Besoins en eau : pendant le cycle végétatif, la canne à sucre nécessite entre 100 et 170 mm d'eau par mois, en fonction des conditions climatiques, avec un total annuel de 1000 à 2000 mm.
- Besoins en lumière : la canne à sucre exige une exposition abondante à la lumière, à la fois pour sa croissance et pour la formation du saccharose. Les plants cultivés dans des conditions lumineuses optimales présentent des caractéristiques telles que des tiges plus épaisses et plus trapues, des feuilles plus larges et plus épaisses, ainsi que des racines plus développées. La lumière favorise également la maturation en réduisant la teneur en eau des cannes. De plus, la floraison de la canne à sucre ne peut se produire en présence de lumière.

Conclusion partielle

Le BVHBKB avec une superficie de 9 688 km² est sous l'influence d'un climat tropical de transition caractérisé par deux saisons (une saison pluvieuse et une saison sèche). Comme sur l'ensemble des bassins versants de la Côte d'Ivoire, la variabilité climatique s'est traduite par des ruptures dans les séries pluviométriques à partir des années 1970 sur le BVHBKB. Ces ruptures ont entraîné des déficits pluviométriques allant de 10 à 30 %. La longue période des déficits pluviométriques (1970-2000) a eu un effet prononcé sur les écoulements. Les modules interannuels avant et après la rupture pluviométrique en 1970 sont respectivement de 101,6 m³/s et 38,1 m³/s, soit un déficit d'écoulement de 62,5 %. Dans un tel contexte de changement climatique sur un bassin versant agricole, la gestion de l'eau est essentielle pour garantir la stabilité de la production agricole et, par la suite, la sécurité alimentaire. L'étude du fonctionnement hydrologique du BVHBKB sera effectuée à l'aide d'un modèle hydrologique distribué afin de mieux comprendre les interactions entre le climat, la dynamique d'occupation des sols et les écoulements. La modélisation hydrologique permettra également une meilleure gestion de la ressource en eau et une bonne planification des activités agricoles. Cependant la mise en place d'un modèle hydrologique distribué tel que SWAT nécessite une bonne préparation des données et une bonne maîtrise des étapes méthodologiques telles que décrites dans la suite de cette étude.

PARTIE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES

CHAPITRE 3 : MATÉRIEL

Ce chapitre expose les données, le matériel de terrain et le matériel de traitement de données exploités dans le cadre de cette étude. Il détaille également les origines d'acquisition de ces données ainsi que leurs usages. Les informations concernent notamment les données climatiques, hydrologiques, les données provenant de la télédétection et de la cartographie.

3.1. Données

Les données utilisées pour réaliser cette étude se composent de données climatiques, hydrologiques, agronomiques, pédologiques et d'images satellitaires.

3.1.1. Données climatiques

3.1.1.1. Présentation des données climatiques historiques observées

Les données observées collectées dans le cadre de cette étude sont la pluviométrie et la température minimale et maximale. Ces données sont à pas de temps journalier. Elles proviennent des stations de Korhogo, Ferkessédougou, Boundiali, Tengréla et Ouangolodougou. Elles ont été recueillies auprès de la Sucrerie d'Afrique Côte d'Ivoire (SUCAF-CI) uniquement au niveau de la station de Ferkessédougou et auprès du service de la météorologie nationale, Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) pour les autres stations. Le choix de ces stations s'explique par la disponibilité de leurs données historiques complètes et surtout, par leur proximité à la zone d'étude par rapport aux autres stations du Nord de la Côte d'Ivoire. Ces données sont réparties dans le temps comme suit (Tableau I).

Tableau I : Données climatiques observées utilisées

Stations	Coordonnées		Périodes	
	Latitude	Longitude	Pluie	Température
Korhogo (station synoptique)	9,416	-5,616	1976-2019	1976-2019
Ferkessédougou (station synoptique)	9,6	-5,2	1976-2019	1976-2019
Boundiali (station pluviométrique)	9,516	-6,466	1976-2016	1976-2016
Tengréla (station pluviométrique)	10,478	-6,392	1976-2016	---
Ouangolodougou (station pluviométrique)	9,968	-5,153	1976-2016	---

3.1.1.2. Données de modèles climatiques utilisés

Les données utilisées sont issues de 10 modèles climatiques régionaux CCLM4, CanESM2, RCA4, MIROC, MOHC, MPI, IPSL, NOAA, NCC et RACMO 22T de résolution 45x45. Ces modèles sont beaucoup utilisés en Côte d'Ivoire dans les études du changement climatique et ont montré leur performance (Kouakou, 2011 ; Yao, 2015 ; Yéo, 2017 ; Sawadogo, 2020). Les

données des modèles climatiques utilisés concernent les données de pluie et de température minimale et maximale. Ces données couvrent les périodes 1976-2005 (période historique) et 2021-2050 (période future) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

3.1.2. Données d'images satellitaires

Les images satellitaires utilisées sont composées d'images Landsat TM, ETM+ et OLI TIR en raison de leur disponibilité. Elles sont enregistrées respectivement le 06 novembre 1990, le 21 décembre 2006 et le 20 décembre 2020. Ces images (Path-Row : 197-053, 197-054 et 198-053) de 30 m de résolution sont fournies gratuitement sur le site web : <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Elles ont servi à la réalisation des cartes d'occupation des sols.

Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé avec une résolution de 30 m, est disponible gratuitement sur le même site web précédent (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Elle a servi de donnée auxiliaire (carte de la végétation, du découpage administratif et des cours d'eau) à la dynamique d'occupation des sols et de donnée topographique à la modélisation hydrologique.

3.1.3. Données pédologiques

Les données pédologiques utilisées sont différentes en format raster ont été mobilisées à cet effet. La carte pédologique de toute l'Afrique établie par la FAO en 1995 a été utilisée. Cette carte a été choisie en raison de la disponibilité des analyses de toutes les propriétés physico-chimiques des sols réalisées par Reynolds *et al.* (1999), essentielles à la mise en place du modèle SWAT.

3.1.4. Données agronomiques

Les données agronomiques concernent essentiellement la production annuelle et les superficies des parcelles des complexes sucriers de Ferkessédougou. Ce sont celles des campagnes de 2006 à 2016 du complexe sucrier pour les cannes pluviales et celles des campagnes de 2000 à 2016 pour les cannes irriguées. Également, les quantités d'eau mensuelles pompées pour l'irrigation, pour les besoins de production d'usine et pour les usages domestiques ont été utilisées. Les données de production de canne à sucre ont servi à l'étude d'impact des paramètres climatiques sur la production de la canne à sucre et les données d'eau brute pompée sont utilisées pour la détermination de l'adéquation disponibilité-besoin en eau du complexe sucrier de Ferkessédougou. Ces données sont accessibles auprès de la SUCAF-CI.

3.1.5. Données hydrologiques

Les données hydrologiques utilisées concernent les débits de la station hydrométrique de Route Korhogo-Badikaha obtenue auprès de la direction hydrologique de la SUCAF-CI. Ces données à l'échelle journalière, couvre la période de 1976 à 2016. Elles serviront au calage et à la validation des modèles SWAT, HEC RAS et à la simulation de l'adéquation disponibilité-besoins en eau des complexes sucriers de Ferkessédougou.

3.2. Matériel de terrain

Le matériel de terrain utilisé est constitué d'instruments ou d'appareils techniques (Annexe 2) à savoir :

- une bouteille hydrologique de type Niskin pour les prélèvements d'échantillon d'eau pour l'analyse des matières en suspension ;
- un GPS portatif modèle Garmin utilisé pour déterminer les coordonnées géographiques des points dans la zone d'étude ;
- une benne Van Veen et des sachets plastiques pour le prélèvement de sédiments lacustres ;
- un hors-bord pour les déplacements sur les plans d'eau ;
- un débitmètre de type OTT Qliner 2 pour les mesures des vitesses du courant ;
- un échosondeur de marque Lawrence, modèle Elite 9Ti pour les levés bathymétriques.

3.3. Matériel de laboratoire

Les analyses au laboratoire concernent les échantillons d'eau collectés pour la détermination de la concentration de matières en suspension entrant dans les retenues d'eau Morrisson et Lokpoho. Le matériel de laboratoire utilisé comprend (Annexe 3) :

- une rampe de filtration munie d'un moteur pour l'extraction des matières en suspension ;
- des filtres Whatman pour la détermination des charges solides en suspension ;
- une étuve (Memmer) pour sécher les filtres contenant les matières en suspension ;
- une balance de précision Mettler Toledo PB15 utilisée pour déterminer la masse des matières en suspension.

3.4. Logiciels de traitement des données

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé les logiciels suivants :

- ArcGIS 10.4 pour le traitement des données SIG ;
- CMHYD pour la correction des paramètres climatiques ;
- ENVI 4.7 pour le traitement des images satellitaires Landsat et la réalisation des cartes d'occupation des sols ;

- HEC RAS 6.3.1 pour la modélisation hydraulique ;
- HYFRAN PLUS pour la détermination des fréquences extrêmes hydrologiques ;
- Land Change Modeler (LCM), un module du logiciel Terrset, pour la modélisation du changement d'occupation des sols ;
- RCLIMDEX pour la détermination des indices de changement climatique ;
- SWAT 2012 pour la modélisation hydrologique ;
- XLSTAT associée au tableur Excel pour les traitements statistiques des données.

Conclusion partielle

Dans ce chapitre, il a été question de présenter le matériel de terrain, les logiciels et les données qui ont été utilisés dans cette étude. Il présente également les différents modes d'acquisition de ces données ainsi que leurs sources. Il s'agit des données climatiques, hydrologiques, des données de télédétection et de cartographie. La précision des résultats sera influencée par la qualité de toutes ces données regroupées, ainsi que par une bonne maîtrise de l'utilisation des outils de traitement de ces données. Le prochain chapitre exposera l'approche méthodologique adoptée pour le traitement des données mentionnées précédemment.

CHAPITRE 4 : MÉTHODES

4.1. Caractérisation du changement climatique sur la période 2021-2050

Les variations climatiques abordées dans cette étude concernent la sécheresse pluviométrique, l'évolution des extrêmes climatiques et hydrologique, les diminutions ou augmentations relatives des températures et précipitations sur la période 2021-2050. Les variables climatiques issues des sorties de modèle à l'horizon 2050 sont comparées à la moyenne de la période 1986-2016. Les variations des paramètres climatiques peuvent être exprimées sous forme d'amplitude en degré Celsius pour les températures, en lame d'eau tombée (mm) ou de taux de variation en pourcentage (%) pour les précipitations.

4.1.1. Détermination de la sécheresse pluviométrique passé et future

L'indice standardisé des précipitations (SPI) est un indice employé pour évaluer les niveaux de sécheresse dans le BVHBKB sur les périodes 1986-2016 et 2021-2050. Pour cela, on commence par ajuster les données de précipitations à une fonction de distribution de probabilité, avant de les transformer en une distribution normale (Cassamani *et al.*, 2007). Pour cette étude, la distribution Gamma à deux paramètres est choisie pour incorporer les données de précipitations des séries temporelles en raison de leur distribution asymétrique (Wilks, 2006). La distribution gamma est définie par sa fonction de densité de probabilité, représentée par l'équation (20) :

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \quad \text{pour } x, \alpha, \beta > 0 \quad (\text{Équation 19}),$$

avec, α = indice de forme, β = indice d'échelle, x = précipitations (mm), $\Gamma(\alpha)$ = valeur de la fonction Gamma et \bar{x} = précipitations moyennes (mm) et f = la fonction de distribution Gamma.

La série temporelle des précipitations du bassin versant du Haut Bandama a été analysée en utilisant la fonction Gamma pour les valeurs de précipitations supérieures à zéro. Lorsque les valeurs sont non nulles, la probabilité cumulée des valeurs nulles et non nulles est déterminée. Cette probabilité est exprimée par la fonction $H(x)$, définie par l'équation 21 :

$$H(x) = q + (1 - q)F(x, \alpha, \beta) \quad (\text{Équation 20}),$$

avec, $H(x)$ = probabilité cumulé et q = probabilité des pluies nulles.

Ensuite, la probabilité cumulative est convertie en une fonction de distribution normale standard. Les valeurs de la moyenne et de la variance du SPI sont fixées à zéro et un, respectivement. Cette transformation est effectuée en utilisant des fonctions de transformation

approximatives appropriées, comme décrit par Mishra *et al.* (2007) selon les équations 22 et 23 suivantes :

$$SPI = - \left(k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right), k = \sqrt{\ln \frac{1}{(H(x))^2}} \text{ avec } 0 < H(x) \leq 0,5 \quad (\text{Équation 21}),$$

$$SPI = + \left(k - \frac{c_0 + c_1 k + c_2 k^2}{1 + d_1 k + d_2 k^2 + d_3 k^3} \right), k = \sqrt{\ln \frac{1}{(1-H(x))^2}} \text{ avec } 0,5 < H(x) < 1 \quad (\text{Équation 22}),$$

où $d_2 = 0,189269$, $d_3 = 0,001308$, $c_0 = 2,515517$, $c_2 = 0,010328$, $c_1 = 0,802853$, $d_1 = 1,432788$

La classification du degré de sécheresse en fonction des valeurs de l'indice SPI sont telle qu'une valeur négative de l'indice SPI indique un état de sécheresse, tandis qu'une valeur positive indique un état d'humidité selon McKee *et al.* (1993) (Tableau II).

Tableau II : Classification de la sécheresse suivant les valeurs des SPI

Valeur de l'indice SPI	Degré de la sécheresse et de l'humidité
> 2,00	Extrême humidité
1,50 à 1,99	Forte humidité
1,00 à 1,49	Humidité modérée
0 à 0,99	Humidité atténuée
0 à -0,99	Sécheresse atténuée
-1,00 à -1,49	Sécheresse modérée
-1,50 à -1,99	Intense sécheresse
<-2,00	Extrême sécheresse

4.1.2. Détermination de la sécheresse hydrologique

L'indice de sécheresse des débits (SDI) est un outil utilisé pour évaluer la réponse d'un cours d'eau aux déficits de précipitations, permettant ainsi d'analyser les variations et les déficits de débit (Nalbantis & Tsakiris, 2009). Pour calculer le SDI, une série mensuelle de mesures de débit sur une période spécifique Q_{ij} est requise, où i représente l'année hydrologique et j le mois correspondant dans cette année. Le premier mois est désigné par $j=1$ et le dernier mois de l'année hydrologique par $j=12$. À partir de cette série de données, l'équation 24 est appliquée pour obtenir le volume cumulé écoulé de la i -ième année hydrologique :

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{12} Q_{i,j} \quad i = 1; 2; \dots j = 1; 2; \dots 12 \quad k = 1; 2; 3; 4 \quad (\text{Équation 23}),$$

où $V_{i,k}$ est le volume cumulé écoulé de la i -ième année hydrologique (de la série chronologique) de la k -ième période de référence. En se basant sur le volume cumulé écoulé $V_{i,k}$, l'indice de sécheresse hydrologique SDI est défini pour chaque période de référence k de la i -ième année hydrologique de la série suivante par l'équation 25 :

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \overline{V_K}}{S_k} \quad i = 1,2, \dots k = 1,2,3,4 \quad (\text{Équation 24})$$

où $\overline{V_K}$ et S_k sont la moyenne et l'écart-type respectivement du volume cumulatif écoulé pendant la période de référence k. Cette distribution est ensuite transformée en une distribution normale en prenant le logarithme népérien (ln) des débits (équation 26 et 27) (Nalbantis & Tsakiris, 2009) :

$$SDI_{i,k} = \frac{Y_{i,k} - \overline{y_k}}{S_{y,k}} \quad i = 1,2, \dots k = 1,2,3,4 \quad (\text{Équation 25})$$

$$\text{avec, } y_{i,k} = \ln(V_{i,k}) \quad i = 1,2, \dots k = 1,2,3,4 \quad (\text{Équation 26})$$

$SDI_{i,k}$ et $Y_{i,k}$ sont les logarithmes népériens des débits cumulés avec $\overline{y_k}$ la moyenne et $S_{y,k}$ l'écart-type estimé sur une longue chronique. Cinq (5) états sont considérés en partant de 0 (pas de sécheresse) à 4 (sécheresse extrême) et sont définis à travers comme suit selon Nalbantis & Tsakiris (2009) (Tableau III) :

Tableau III : Classification des états de sécheresse hydrologique

Etat	Description	Critère
0	Pas sèche	SDI = 0
1	Légèrement sèche	-1 < SDI < 0,0
2	Modérément sèche	-1,5 < SDI < -1,0
3	Sévèrement sèche	-2 < SDI < -1,5
4	Extrêmement sèche	SDI < -2,0

4.1.3. Détermination de l'influence de la sécheresse pluviométrique sur l'hydrologie

Pour étudier la relation entre les sécheresses météorologiques et hydrologiques dans le bassin versant du Haut Bandama, nous avons évalué le coefficient de corrélation entre les indices SPI et SDI déterminés précédemment. Selon López-Moreno *et al.* (2013), le coefficient de corrélation est une méthode particulièrement efficace pour analyser les relations potentielles entre deux variables indépendantes. Ce coefficient est calculé à l'aide du tableur Excel.

4.1.4. Caractérisation de l'occurrence de sécheresse : contribution des chaînes de Markov

L'approche des chaînes de Markov est utilisée à une échelle annuelle pour évaluer la persistance de la sécheresse, un défi majeur pour l'agriculture (Samba & Mpounza, 2005). Elle est appliquée sur les périodes 1986-2016 et 2021-2050. Le modèle des chaînes de Markov est un modèle stochastique itératif qui exprime les probabilités conditionnelles de transition d'un état d'une

année donnée (année en cours) à l'état de l'année passée (année précédente). Dans un processus de Markov d'ordre 1, l'état de l'année k est influencé par l'état de l'année $k-1$. Dans un processus de Markov d'ordre 2, l'état de l'année k dépend à la fois de l'état de l'année $k-1$ et de celui de l'année $k-2$ (Mélèdje *et al.*, 2015). Une année peut être caractérisée du point de vue pluviométrique par deux états :

- Un état 0 : présence de la sécheresse (sèche ou très sèche) ;
- Un état 1 : absence de la sécheresse (normale, humide, très humide).

4.1.4.1. Chaînes de Markov d'ordre 1

Une probabilité est utilisée pour introduire la chaîne de Markov d'ordre 1 (Équation 28) :

$$P_r = \{X_t = j / X_{t-1} = i\} = P_{ij} \quad \text{avec} \quad P_{ij} = N_{ij} / N_i \quad (\text{Équation 27})$$

P_{ij} est la probabilité que le processus, fasse une transition de l'état i vers l'état j . Il est possible de déterminer les couples d'années N_{ij} selon l'équation 29 suivante :

$$\begin{cases} N_0 = N_{00} + N_{01} \\ N_1 = N_{10} + N_{11} \\ N = N_0 + N_1 \end{cases} \quad (\text{Équation 28})$$

N_0 , N_1 et N représentent le nombre d'années respectivement sèches, humides et le nombre total d'années d'observation. N_{01} et N_{10} représentent le nombre d'années où il y a eu une transition de l'état d'une année sèche à une année humide et d'une année humide à une année sèche. P est la matrice des probabilités conditionnelles P_{ij} , où la somme des probabilités conditionnelles de chaque ligne est égale à l'unité (Équation 30).

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots \\ P_{10} & P_{11} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i1} & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{Équation 29})$$

4.1.4.2. Chaînes de Markov d'ordre 2

Pour la chaîne de Markov d'ordre 2, la matrice de transition d'ordre 2 est formulée de la manière suivante (Équation 31) :

$$P_{ijk} = \frac{N_{ijk}}{N_{ij}} \quad , \quad \text{avec} \quad \sum_{j,k} P_{ijk} = 1 \quad (\text{Équation 30})$$

Où P_{ijk} représente la probabilité conditionnelle d'obtenir un doublé de classe (j, k) succédant à un doublé de classe (i, j) .

A l'issue des équations 30 et 31, la chaîne de Markov de premier ordre et de second ordre permet de calculer la probabilité d'avoir n années consécutives de sécheresse (Équation 32) (Équation 33) (Lana & Burgueno, 1989) :

$$Q_1(n) = (1 - P_{01})^{n-1} P_{01} \quad n \geq 1 \quad (\text{Équation 31})$$

$$Q_2(n) = P_{100} P_{000}^{n-2} P_{001} \quad n \geq 2 \quad (\text{Équation 32})$$

L'expression pour la période de retour $T(n)$ (intervalle entre deux sécheresses successives) de longueur n serait la suivante : pour Markov 1 on a l'équation 34 et pour Markov 2 on a l'équation 35 (Akyuz *et al.*, 2012) :

$$T(n) = \frac{1}{[(1-P_{01})^2 P_{00}^{n-1} P]} \quad \text{avec } P = P(X \leq x_0) \quad (\text{Équation 33})$$

$$\text{On a : } T(n) = \begin{cases} 2 \left(1 + \frac{P_{100}}{P_{001}}\right) / P_{101} & n = 1 \\ 2 \left(1 + \frac{P_{100}}{P_{001}}\right) / (P_{100} P_{000}^{n-2} P_{001}) & n \geq 2 \end{cases} \quad (\text{Équation 34})$$

4.1.5. Redéfinition de la saison agricole pour la canne à sucre pluviale dans les complexes sucriers de Ferkessédougou

La saison représente la période annuelle où les conditions climatiques demeurent constantes. Dans cette partie des travaux, on a caractérisé la saison humide par la permanence d'eau disponible dans le sol (donc en-deçà du point de flétrissement). Cette saison débutera par conséquent au moment, noté A_2 , où le déficit maximal du sol (supposé nu à cette époque), atteint durant la saison sèche, commence à décroître sous l'effet des premières pluies. Et elle se terminera au moment, noté C_2 , où ce déficit maximal se trouve de nouveau atteint, la culture ayant épuisé les réserves utilisables du sol (Franquin, 1968). La représentation sur un même graphique des courbes de précipitations moyennes décadaires et d'évapotranspiration potentielle moyenne décadaire (ETP), permet de déterminer la succession d'événements bioclimatiques (Figure 8). Ainsi, sur la figure 9, différentes périodes peuvent être distinguées :

- A_1C_1 = saison pluvieuse ;
- A_1A_2 = pluies précoces, $p < \frac{1}{2}$ ETP ;
- A_2C_2 = saison humide.

Les résultats de calcul obtenus à partir de différentes méthodes proposées par TURC pour évaluer l'évapotranspiration potentielle (1961) et l'évaporation du sol nu (1953) indiquent que lorsque la quantité de précipitations mensuelles dépasse la moitié de l'évapotranspiration potentielle (ETP), le sol nu commence à reconstituer ses réserves en eau. Étant donné que

l'évaporation d'un sol nu spécifique dépend de ses caractéristiques propres, on peut initialement considérer que, quelle que soit la méthode d'estimation de l'évapotranspiration potentielle, le déficit hydrique du sol nu commence généralement à diminuer dans les régions tropicales lorsque les précipitations (P) atteignent la moitié de l'ETP. Les précipitations antérieures ayant contribué à reconstituer les réserves en eau de la couche superficielle du sol au-delà du point de flétrissement. La détermination et la caractérisation du bilan hydrique ainsi faites à travers la Figure 8 permet d'intégrer aisément le cycle cultural d'une plante quelconque selon Franquin (1968).

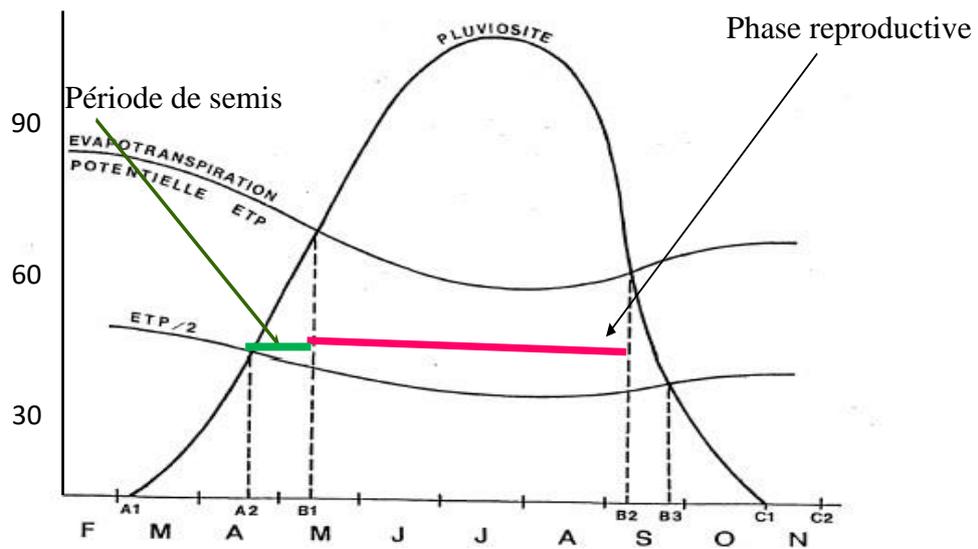


Figure 8 : Détermination du bilan bioclimatique

4.1.6. Caractérisation des extrêmes climatiques

Les données recueillies sur les stations de Korhogo, Ferkessedougou et Boundiali sur la période 1986-2016, ont permis d'analyser les tendances climatiques sur trois décennies, mettant en lumière les évolutions récentes du climat.

L'évaluation des indices climatiques a été réalisée à l'aide du logiciel RCLimDex, conçu en différentes étapes par Frich *et al.* (2002) et Zhang & Yang (2004). Ce logiciel, disponible sur le site : <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>, est écrit en langage R et offre une interface graphique conviviale permettant de calculer 27 indices météorologiques.

Dans le cadre de cette étude huit (7) indices pluviométriques et sept (7) indices de températures recommandées par l'OMM (2012) sont utilisés pour la caractérisation des extrêmes climatiques dans le BVHBKB (Tableau IV).

Tableau IV : Indices de changement climatique retenus

Indices de Température	
Indice	Définition
TXx	Température maximale la plus élevée dans l'année
TNn	Température minimale la plus basse dans l'année
DTR	Donne la moyenne mensuelle de la différence entre la température mensuelle maximale et la température mensuelle minimale. Il permet d'évaluer la tendance des amplitudes thermiques
CSDI	Nombre de jours dans l'année avec au moins six jours consécutifs où $T_{min} < 10^{\circ}$ percentile
TN90p	Pourcentage des jours avec $T_{min} > 90^{\text{ème}}$ percentile
TX90p	Pourcentage des jours avec $T_{max} > 90^{\text{ème}}$ percentile
WSDI	Nombre de jours dans l'année avec au moins six jours consécutifs où $T_{max} > 90^{\circ}$ percentile
Indices de précipitation	
Indice	Définition
PRCPTOT	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux ($RR \geq 1,0$ mm)
RX1day	Précipitation totale maximale d'un jour pluvieux
Rx5day	Précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs pendant l'année
Rx20day	Précipitation totale maximale sur 20 jours pluvieux consécutifs pendant l'année
R95p	Précipitation totale annuelle avec précipitation totale $RR_{ij} > 95^{\circ}$ percentile
CDD	Nombre maximal des jours consécutifs avec précipitations journalières < 1 mm
CWD	Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières ≥ 1 mm

Les indices mensuels et annuels ne sont pas calculés en présence de trois jours manquants par mois et 15 jours par an respectivement. De plus, les indices seuils ne sont établis que lorsque l'on dispose d'au moins 70 % des données nécessaires. En ce qui concerne la pluviométrie, différents seuils sont rencontrés dans la littérature pour le CDD et le CWD, variant entre 1 mm et même 0,1 mm.

Pour le BVHBKB, le seuil de 1 mm de pluie a été retenu. En effet, le seuil généralement utilisé pour comptabiliser le nombre de jours secs ou pluvieux dans l'année est 1 mm (Khaldi, 2005 ; Aguilar *et al.*, 2009 ; Costa & Soares, 2009). L'utilisation du seuil de 1 mm se justifie par le fait qu'en dessous de celui-ci, les eaux des pluies correspondantes ne sont pas absorbées par les sols mais directement évaporées (Ceballos, 2004). Les paramètres d'entrée de RCLimDex comprennent ;

- les années de début et de fin de la période de référence, ainsi que la latitude de la station ;
- les valeurs minimale et maximale de précipitation quotidienne ;
- les seuils haut et bas de température maximale quotidienne ;
- les seuils haut et bas de température minimale quotidienne.

Les résultats après traitement dans le logiciel RClimDex sont sauvegardés sous forme de fichiers Excel et de fichiers JPEG pour les graphiques. Les tendances sont établies de manière linéaire en utilisant la méthode des moindres carrés. RClimDex exclut la première année d'une période de base de 31 ans de données ou ajoute une année supplémentaire si seulement 30 ans sont pris en compte pour la période de base conformément aux directives de l'OMM (Zhang & Yang, 2004 ; Hegerl *et al.*, 2006).

L'indice moyen peut indiquer une tendance à la hausse, à la baisse ou à la stagnation, en fonction de l'indicateur analysé. Cette tendance, présumée linéaire, peut fluctuer dans le temps en raison de son étroite corrélation avec les contraintes inhérentes à la série temporelle sélectionnée, comme noté par Sneyers (1990). Les indices sont calculés individuellement pour chaque station, et la tendance est évaluée à l'aide de la méthode des moindres carrés.

4.1.7. Détermination de l'influence de la variation des extrêmes climatiques sur la production de la canne à sucre pluviale

La détermination de la corrélation entre la variation des extrêmes climatiques et la production de la canne à sucre pluviale se base sur deux analyses statistiques qui sont : l'analyse en composante principale et la régression linéaire multiple. Ces analyses sont basées sur le rendement et l'évolution des paramètres extrêmes climatiques. Les cannes irriguées ne sont pas concernées par cette analyse en raison de leur faible indépendance des paramètres climatiques (Dosso, 2023).

4.1.7.1. Calcul du rendement de la canne pluviale

Le rendement de la canne à sucre pour chaque parcelle est le rapport entre la production et les superficies cultivées (Équation 36).

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Production (en tonne)}}{\text{Superficies (en ha)}} \quad (\text{Équation 35})$$

4.1.7.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

La Méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP) est un traitement statistique qui simplifie l'analyse de grands ensembles de données en considérant leur complexité multidimensionnelle. Elle est particulièrement utile dans l'étude de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques (Ardoin-Bardin, 2004). Cette approche permet de mettre en lumière les liens entre différentes variables en les regroupant en un nombre restreint de composantes significatives. La mise en œuvre de l'ACP implique plusieurs étapes telles que la

sélection des dimensions, la projection des variables, l'évaluation de leur qualité de représentation ainsi que la contribution de chaque variable.

Dans cette étude, le critère de Kaiser en ACP normée a été utilisé, attribuant un poids égal à toutes les variables. Les axes associés à des valeurs propres supérieures à 1 sont identifiés comme les composantes principales ou axes principaux.

4.1.7.3. Régression linéaire multiple

La méthode de régression linéaire multiple se révèle être une approche statistiquement pertinente pour examiner l'effet des divers indices de pluviométrie et de température sur les tendances de production observées pendant la période allant de 2006 à 2016. En terme simple, elle permet d'évaluer de manière statistique les facteurs qui influent sur les variations du rendement de la canne à sucre (ΔY) par rapport aux prédicteurs (ΔX_i) choisis. L'évolution du rendement de la canne à sucre (ΔY) en fonction des fluctuations des indices climatiques au sein des complexes sucriers de Ferkessédougou est décrite par l'équation 37 :

$$\Delta Y = \sum m_i * \Delta X_i + b_i \quad (\text{Équation 36})$$

où : ΔY représente du rendement de la canne à sucre pluviale, m_i : la sensibilité du rendement de canne (le poids de la régression) par rapport aux variables ΔX_i . ΔX_i représente les indices climatiques et b_i traduit les effets non linéaires potentiels des variables ΔX_i , tels que ceux qui résultent des interactions avec d'autres variables.

Bien que cette équation fournisse une estimation approximative de la variation annuelle du rendement de la canne à sucre dans les complexes sucriers, elle ne tient pas compte de tous les facteurs. Afin de quantifier plus précisément la variance entre le rendement de la canne à sucre et les indices des conditions météorologiques extrêmes, des tendances statistiquement significatives ont été définies à des niveaux de signification marginaux (p-value) inférieurs à 0,05, ce qui correspond à une significativité au seuil de 95 %.

4.1.8. Évaluation du changement climatique dans le bassin versant du Haut Bandama à Route Korhogo-Badikaha sur la période 2021-2050

4.1.8.1. Fiabilité et choix des modèles climatiques régionaux

Le diagramme de Taylor a été utilisé et appliqué aux séries mensuelles standardisées de précipitations de 10 MCR (CCLM4, RCA4, MIROC, MOHC, MPI, IPSL, NOAA, NCC, RACMO 22T et CanESM2) sur la période observée. C'est un diagramme bidimensionnel qui permet de voir le lien entre les données observées et simulées à partir de trois paramètres statistiques concis tels que : la corrélation (R) qui prime sur les deux autres, l'erreur quadratique

moyenne (RMSE) et l'écart type (Figure 9). En guise d'exemple, sur la Figure 9, les modèles simulés qui concordent bien avec les observations se situent le plus près du point marqué "observé" sur l'axe des abscisses. Ces modèles ont une corrélation relativement élevée et de faibles erreurs quadratiques moyennes. Les modèles situés sur l'arc en pointillés ont un écart-type correct (ce qui indique que les variations du modèle sont de bonne amplitude). La figure 9 montre que les modèles A et C sont généralement ceux qui correspondent le mieux aux observations, chacun ayant à peu près la même erreur quadratique moyenne. Le modèle A présente toutefois une corrélation légèrement plus élevée avec les observations et a le même écart-type que les observations, tandis que le modèle C présente une variabilité spatiale trop faible (avec un écart-type de 2,3 mm/mois par rapport à la valeur observée qui est de 2,9 mm/mois).

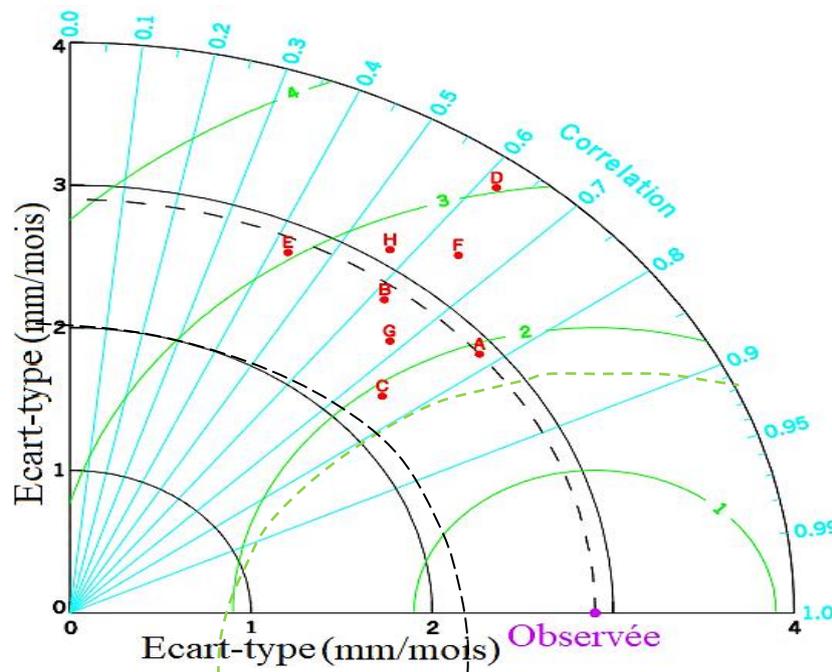


Figure 9 : Comparaison entre les pluies moyennes mensuelles simulées et observées
Source : Taylor (2001)

4.1.8.2. Comparaison des régimes saisonniers de températures et de précipitations entre les observations et modèles

Le régime saisonnier des température moyenne mensuelle et des précipitations moyenne mensuelle a été représenté sur la période 1976-2005. Pour chaque paramètre, est représentée sur un graphique les amplitudes moyennes mensuelles des modèles climatiques régionaux retenues et celles des observations dans l'optique de s'assurer que les modèles reproduisent correctement la variabilité saisonnière des températures et des précipitations du BVHBKB.

4.1.8.3. Test statistique appliqué

Le test non paramétrique de Mann & Whitney (1947) a été appliqué pour évaluer la significativité de la différence entre les séries observées et simulées par les modèles et pour les différents scénarios sur différentes périodes. Il permet d'évaluer la ressemblance de la variabilité entre deux séries (observée et simulée). Le seuil de significativité de 5 % est fixé entre les couples de séries. Ce test est réalisé à l'aide du logiciel XLSTAT.

4.1.8.4. Correction des biais de précipitations et de températures journalières simulées par la méthode quantile-quantile

Les modèles climatiques fournissent souvent des représentations biaisées des séries chronologiques observées. Ce qui rend nécessaires des procédures de correction (Christensen *et al.*, 2007 ; Teutschbein & Seibert, 2010). Les procédures de correction du biais utilisent un algorithme de transformation pour ajuster les sorties des Modèles Climatique Régionaux (MCR). L'idée sous-jacente est l'identification des biais possibles entre les variables climatiques observées et simulées, ce qui constitue une référence pour corriger à la fois les séries de contrôle et les séries issues des scénarios de MCR. Les méthodes de correction des biais sont supposées être stationnaires, c'est-à-dire que l'algorithme de correction et sa paramétrisation pour les conditions climatiques actuelles sont également valables pour les conditions futures. Les méthodes de correction de biais couramment utilisées sont : la méthode du delta, la mise à l'échelle linéaire et la correction quantile-quantile.

La méthode quantile-quantile retenue pour la correction des biais des données de pluies journalières simulées permet de corriger à partir des quantiles observés, les quantiles simulés par les MCR. Elle est beaucoup plus appropriée à la correction des données pluviométriques journalières qui se caractérisent par une forte variabilité temporelle et spatiale (Ali *et al.*, 2003). Cette correction est mise en œuvre à l'échelle journalière pour respecter la fréquence et le régime saisonnier de la pluie (Ibrahim, 2012).

L'application de cette méthode consiste dans un premier temps à établir une égalité entre les cumuls moyens mensuels observés et les cumuls moyens simulés sur la période de référence (Équations 38 et 39).

Ainsi, pour un mois m , de la période choisie, on pose :

$$\overline{P_m^{Obs}} = \overline{P_m^{Sim,réf}} \quad (\text{Équation 37})$$

De façon générale on écrit :

$$\overline{P_m^k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{Nm} P_{m,i}^k \quad (\text{Équation 38})$$

N : Nombre d'années de la période de référence ;

N_m : Pluie moyenne mensuelle du mois m pour un scénario donné et une série de données ;

$\overline{P_m^k}$: Pluie moyenne journalière du mois m pour un scénario donné et une série de données k (observée, simulée), avec $m \in [1 ; 12]$;

P_m^k : Hauteur de la $i^{\text{ème}}$ pluie de la série ordonnée du mois m d'une série k (Équations 40 et 41).

Ainsi, comme indiqué dans les étude Mishra and Herath (2011) :

$$\overline{P_m^{Obs}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_m^{Obs}} P_{m,i}^{Obs} \quad (\text{Équation 39})$$

$$\overline{P_m^{Sim}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_m^{Sim}} P_{m,i}^{Sim} \quad (\text{Équation 40})$$

avec :

N_m^{Obs} , N_m^{Sim} : Nombre de jours de pluie des N années de la période, du mois m des données observées et simulées.

$P_{m,i}^{Obs}$, $P_{m,i}^{Sim}$: Hauteur de pluie de rang i du mois m des données observées et simulées. La correction va ensuite consister à établir une égalité entre N_m^{Obs} et N_m^{Sim} d'une part et d'autre part, entre $P_{m,i}^{Obs}$ et $P_{m,i}^{Sim}$ sur la période de référence pour tout rang i sur la période 1976-2005.

Plusieurs études comparatives des données pluviométriques journalières simulées et observées ont montré que les MCR comportent un nombre important de hauteur de pluies faibles et génèrent des pluies extrêmes (Frei *et al.*, 2006 ; Ibrahim, 2012 ; Fowe, 2015). Aussi, ces modèles ont un nombre de jour de pluie simulée supérieur au nombre de jour de pluie observé, ainsi :

Pour $N_m^{Sim} > N_m^{Obs}$: le nombre de pluie simulé par les MCR est réduit en prenant $N_{min} = N_m^{Sim} - N_m^{Obs}$, et corrige les hauteurs de pluie dont le rang dans le classement est supérieur à N_{min} ($i > N_{min}$).

Les hauteurs de pluie dont le rang dans le classement est inférieur à N_{min} sont considérées comme nulles. On note P_{min} la valeur de pluie correspondant au rang N_{min} .

Ainsi pour la période de référence (1976-2005), on a (Équations 42 et 43) :

$$\text{Si } P_{m,i}^{Sim} < P_{min} \rightarrow P_{m,i}^{Sim} (\text{corrigée}) = 0 \quad (\text{Équation 41})$$

$$\text{Si } P_{m,i}^{Sim} > P_{min} \rightarrow P_{m,i}^{Sim} (\text{corrigée}) = P_{m,i}^{Sim} + \Delta_{m,i} \text{ avec } \Delta_{m,i} = P_{m,i}^{Obs} - P_{m,i}^{Sim} \quad (\text{Équation 42})$$

Pour la période future, le seuil minimum est P_{min} , et la formule précédente est appliquée à toute pluie dont la hauteur est inférieure ou égale à la hauteur de la pluie maximale du MCR sur la période de référence ($P_{m,max}^{Sim,ref}$) (Équation 44).

$$\text{Pour, } P_{m,i}^{Sim} > P_{m,max}^{Sim,réf}, P_{m,i}^{Sim}(\text{corrigée}) = \frac{P_{m,i}^{Sim}}{P_{m,max}^{Sim,réf}} * P_{m,max}^{Sim,réf}(\text{corrigée}) \quad (\text{Équation 43})$$

Pour les températures la même procédure est appliquée et on obtient :

$$\text{Si } T_{m,i}^{Sim} > T_{min}, T_{m,i}^{Sim}(\text{corrigée}) = T_{m,i}^{Sim} + \Delta_{m,i} \text{ avec } \Delta_{m,i} = T_{m,i}^{Obs} - T_{m,i}^{Sim} \quad (\text{Équation 44})$$

Ainsi pour la période future :

$$T_{m,i}^{Sim} > T_{m,max}^{Sim,réf}, T_{m,i}^{Sim}(\text{corrigée}) = \frac{T_{m,i}^{Sim}}{T_{m,max}^{Sim,réf}} * T_{m,max}^{Sim,réf}(\text{corrigée}) \quad (\text{Équation 45})$$

4.1.8.5. Détermination des taux de variations des paramètres

Les taux de variation (τ_i^{hor}) des paramètres climatiques estimés sont exprimés en pourcentage et ont pour expression (Équation 47) (Mishra and Herath, 2011) :

$$\tau_i^{hor} = 100 \times \frac{\Delta_i^{hor}}{\bar{X}_i^{réf}} = 100 \times \frac{\bar{X}_i^{hor} - \bar{X}_i^{réf}}{\bar{X}_i^{réf}} \quad (\text{Équation 46})$$

Avec : \bar{X}_i^{hor} = valeur moyenne mensuelle ou annuelle calculée sur l'horizon déterminé

$\bar{X}_i^{réf}$ = valeur moyenne mensuelle ou annuelle calculée sur la période de référence,

τ_i^{hor} = amplitude de variation mensuelle ou annuelle d'un horizon donné.

4.2. Evaluation de la dynamique de l'occupation des sols sur la période 2021-2050

Dans ce chapitre, il est présenté une méthode de traitement des images satellitaires pour l'établissement des cartes de l'occupation des sols du BVHBKB. Ensuite, il est réalisé une méthode d'analyse statistique de l'occupation des sols pour connaître la tendance du changement dans la zone d'étude de 1990 à 2020. Enfin, une troisième partie présentera le modèle utilisé pour la prédiction de l'évolution de l'occupation des sols aux horizons 2035 et 2050.

4.2.1. Traitement numérique des images satellitaires

Les informations contenues dans les images Landsat sont extraites à partir d'un ensemble de deux processus à savoir le prétraitement et le traitement.

4.2.1.1. Prétraitement

Le prétraitement des images satellitaires englobe toutes les opérations visant à rendre les ensembles de images lisibles et superposables. Cela inclut le mosaïquage et l'extraction du secteur d'étude.

Le mosaïquage s'est avéré nécessaire car le secteur d'étude est couvert par trois scènes d'images Landsat (197-053, 197-054 et 198-053). Cette opération a consisté à aligner les bandes identiques des différentes scènes afin de former une image plus grande et cohérente. (Jobin *et al.* 2007 ; Wiederkehr, 2013). Les images ont d'abord été rehaussées dans le but d'uniformiser les teintes des bandes spectrales (Leboeuf & Paquet, 2013). Le secteur d'étude a été extrait à partir des images mosaïquées suivant les limites du bassin versant. Ce traitement pouvant entraîner des pertes d'informations, l'option d'un rééchantillonnage par la méthode du plus proche voisin «Nearest Neighbor» est adoptée, qui selon Dubois *et al.* (1991), conserve les valeurs radiométriques originales de l'image.

4.2.1.2. Traitement

Des compositions colorées combinant les bandes 4-3-2 pour les Landsat TM et 5-6-4 pour les ETM+ et OLI-TIRS (Oszwald, 2005) ont été réalisées. L'objectif est d'avoir une synthèse d'informations en vue d'une bonne discrimination des unités d'occupation des sols (Oszwald, 2005). De plus, l'interprétation visuelle des images qui a pour rôle d'établir une relation entre le terrain et l'image a permis d'identifier sur les différentes images des détails comme : les lambeaux de forêt, les savanes (arborées et arbustives, fourrés et autres végétations basses), les cultures et jachères, les plans d'eau, les bâtis et sols nus (bâtis, carrières, sols nus, routes) et les zones humides.

- Choix de la méthode de classification

Parmi les deux méthodes principales de classification (la classification non-supervisée et la classification supervisée), plusieurs études ont montré que la classification supervisée est plus performante que celle non supervisée (Xiong, 2002 ; Hasmadi, 2009 ; Guerra *et al.*, 2010). Les précisions des résultats par la classification non-supervisée sont relativement faibles. Cette situation peut entraîner une confusion dans les résultats de la classification, ce qui conduit finalement à des erreurs (Richards et Jia, 2006), alors que les résultats obtenus par classification supervisée sont satisfaisants, présentant une cohérence et une compatibilité avec la superposition des images originales (Xiong, 2002 ; Guerra *et al.*, 2010).

Concernant la performance des algorithmes de la classification supervisée, les scientifiques tels que Frinelle & Moody (2001) ; Cetin *et al.* (2004) ; Al-Ahmadi & Hames (2009) ont fait des études comparées entre les différents algorithmes de la classification supervisée. Il en ressort de ces études que l'algorithme maximum de vraisemblance est plus précis dans la classification supervisée.

Par conséquent, la méthode de classification supervisée avec l'algorithme du Maximum de Vraisemblance (MV) pour la classification de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama a été adoptée.

La classification par maximum de vraisemblance est basée sur la règle de décision de maximum de vraisemblance de Bayes (Richards et Jia., 2006). Cette règle est traduite par l'équation 48 :

$$P(x_i|w_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\rho} \sqrt{|C_j|}} \exp\left(\frac{1}{2}(x_i-\mu_j)^T \times C_j^{-1} \times (x_i-\mu_j)\right) \quad (\text{Équation 47})$$

Où :

C_j = Matrice de covariance de la classe w_j avec la dimension ρ ; μ_j = le vecteur de la classe w_j ; x = désigne le déterminant ; $P(x_i | w_j)$ = la probabilité de la coexistence [ou intersection] des événements x et w ; $(x_i - \mu_j)^T$ = vecteur transposé $(x_i - \mu_j)$.

- Classification supervisée

Dans la méthode de classification supervisée, les échantillons d'entraînement sont définis par les RDIs (Régions D'Intérêts). Les RDIs sont des portions d'images sélectionnées par l'utilisateur en dessinant des formes irrégulières pour extraire des données statistiques dans la classification. Dans le cadre de cette étude, le logiciel ENVI 4.7 est utilisé pour la classification de l'occupation des sols. La détermination des RDIs est basée sur les types de catégorie de l'occupation des sols définis ci-dessus (Tableau V). Chaque RDI représente une catégorie thématique qui peut comprendre un ou plusieurs échantillons. Ces derniers sont les clés d'interprétation des images. Ils sont déterminés sur la base des données d'observation, des données auxiliaires et des connaissances de l'analyste pour la zone d'étude.

Tableau V : Choix des classes d'occupation des sols

Classe	Description
Lambeau de forêt	Zones couvertes de morceaux de forêts isolées très souvent le long des cours d'eau.
Zone humide	Concerne les surfaces hydromorphes telles que les basfonds
Plan d'eau	Cette classe est constituée de : lacs, fleuves et rivières
Sols nus ou zones Bâtis	Les zones urbanisées, les routes, les espaces où la couverture végétale est absente ou herbeuse
Savane	Les espaces couverts par les arbustes et des hautes herbes
Culture ou Jachère	Surface cultivée ou pratique agricole consistant à maintenir inutilisée pendant une certaine période une surface agricole pour lui permettre de reconstituer ses réserves en eau, sa capacité de production, etc.

- Validation des résultats de la classification de l'occupation des sols

Les classifications de l'occupation des sols de 1990, 2006 et 2020 ont été effectuées à l'aide des échantillons des images définis et des combinaisons optimales des canaux sélectionnés. Une fois la classification effectuée, il est nécessaire d'évaluer la précision et le coefficient de Kappa pour sa validation. L'évaluation de la précision de cette classification repose sur l'utilisation de la matrice de confusion. Cette dernière permet d'analyser la précision globale des résultats de la classification, incluant le nombre total de pixels correctement classifiés ainsi que le coefficient de Kappa. Elle permet également d'évaluer la précision de chaque classe individuelle, conformément aux recherches menées par Gao & Skillcorn (1998). Le succès de la classification est jugé acceptable si le pourcentage total de pixels correctement classifiés dépasse 85 %, avec des précisions individuelles des catégories similaires (Anderson et al., 1971), et un coefficient Kappa supérieur à 0,80 (Tso & Mather, 2001 ; Mather, 2004). Pour mieux évaluer la fiabilité des cartes produites, notamment celles de 2020, nous avons choisi d'employer deux méthodes : la matrice de confusion, qui utilise la répartition exclusive des pixels, et celle basée sur les points de vérité terrain (Chalifoux *et al.*, 2006). Cette approche permet d'estimer la précision globale des cartes sur le terrain en vérifiant un échantillon de points sélectionnés à partir des cartes produites. Les cartes d'occupation des sols de 1990, 2006 et 2020 ont été produites après évaluation et vérification de leur précision et le coefficient de Kappa en ajoutant des éléments comme le nord géographique, la légende et l'échelle ainsi les cours d'eau sur l'outil cartographique ArcGIS. Les étapes du traitement des images jusqu'à la réalisation des cartes de l'occupation des sols, sont détaillées dans la (Figure 10).

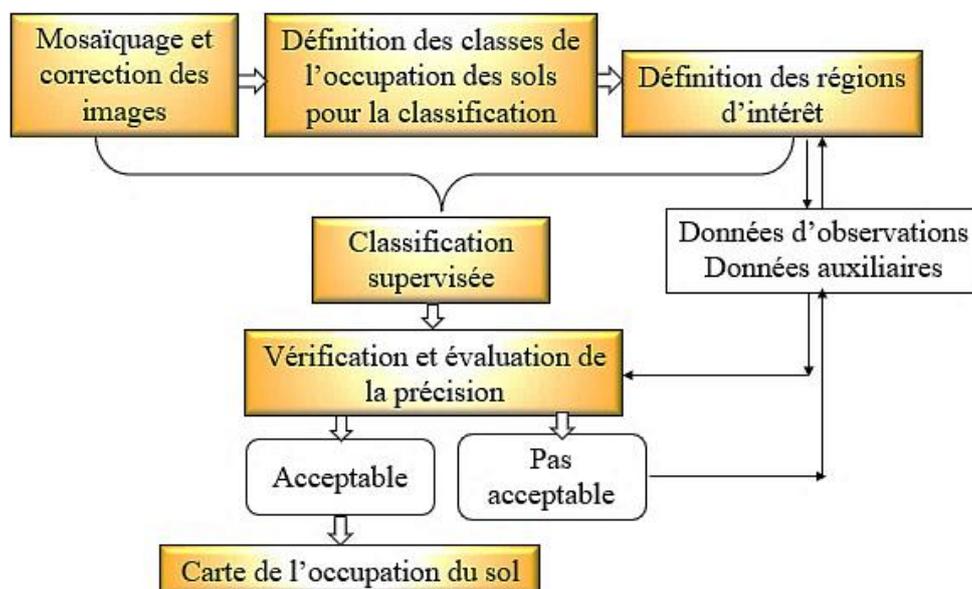


Figure 10 : Organigramme de la méthode de classification supervisée

4.2.2. Traitement statistique des changements d'occupation des sols

Dans le but de montrer l'évolution de chaque catégorie de l'occupation des sols au cours du temps, une série de transformations ensemblistes est utilisée. L'observation des catégories identiques à deux périodes différentes permet d'identifier les zones qui demeurent constantes, celles qui régressent et celles qui progressent dans cette catégorie. Après avoir analysé les changements à partir de trois cartes d'occupation des sols, les variations de superficie pour différentes catégories sont calculées sur les périodes 1990-2006, 2006-2020 et 1990-2020. Les valeurs positives indiquent un accroissement de la superficie de la catégorie au cours de la période étudiée, tandis que les valeurs négatives signalent une réduction de cette superficie entre les deux dates. Les valeurs proches de zéro révèlent une stabilité relative de la catégorie entre les deux périodes considérées.

4.2.2.1. Bilan des gains, des pertes et des persistances

La matrice de transition des trois cartes d'occupation des terres (1990, 2006 et 2020) est utilisée afin d'examiner les changements de superficie des différentes catégories d'occupation des terres sur des périodes spécifiques. Les variations de superficie, représentant les gains, les pertes et les persistances, sont calculées pour chaque catégorie entre deux dates données. Pour chaque catégorie, le gain brut est obtenu en déduisant la persistance de la somme totale de la ligne correspondante, tandis que la perte brute est calculée en soustrayant la persistance de la somme totale de la colonne correspondante. Les équations 48 et 49 expliquent en détail la méthode de calcul des gains (G) et des pertes (L) observés pour chaque catégorie d'occupation des terres entre deux dates (Niang *et al.*, 2021).

$$G_j = \frac{[(\sum_{i=1}^j S_{ij}) - S_{jj}] \times 100}{\sum_{i=1}^j S_{ij}} \quad \text{où} \quad G_j = (\sum_{i=1}^j S_{ij}) - S_{jj} \quad (\text{Équation 48})$$

$$L_i = \frac{[(\sum_{j=1}^i S_{ij}) - S_{ii}] \times 100}{\sum_{j=1}^i S_{ij}} \quad \text{où} \quad L_i = (\sum_{j=1}^i S_{ij}) - S_{ii} \quad (\text{Équation 49})$$

avec :

G_j = Gain de superficie d'une catégorie d'occupation des sols j (km²) ;

L_i = Perte de superficie d'une catégorie d'occupation des sols i (km²) ;

S_{ii} = Superficie inchangée d'une catégorie d'occupation des sols i (km²) ;

S_{jj} = Superficie inchangée d'une catégorie d'occupation des sols j (km²) ;

S_{ij} = Superficie d'une catégorie d'occupation des sol i transformée en j (km²) ;

S_{ji} = Superficie d'une catégorie d'occupation des sols j transformée en i (km²).

L'équation (50) exprime la somme des changements globaux. La superficie totale échangée est dérivée en ajoutant toutes les valeurs de la matrice et en soustrayant les persistances .

$$\text{Changement total} = \frac{\sum_{j=1}^j [(\sum_{j=1}^j S_{ij}) - S_{ii}]}{\sum_{j=1}^j \sum_{j=1}^j S_{ij}} \quad (\text{Équation 50})$$

4.2.2.2. Taux d'évolution des classes d'occupation des sols

Afin d'analyser l'évolution de chaque catégorie d'occupation des terres, on calcule le taux de variation $E_{(i,k)}$ des superficies en utilisant l'équation 51. Si S_i désigne la superficie d'une catégorie d'occupation des terres pour l'année i , et S_k la superficie correspondante pour l'année k , avec $k > i$, tel que défini par Niang *et al.*, (2021), alors $E_{(i,k)}$ est défini comme suit :

$$E_{(i,k)} = \frac{S_k - S_i}{S_i} \times 100 \quad (\text{Équation 51})$$

Si $E_{(i,k)} = 0$, il y a stabilité de cette classe d'occupation des sols ;

Si $E_{(i,k)} < 0$, il y a régression de cette classe d'occupation des sols ;

Si $E_{(i,k)} > 0$, il y a extension ou évolution de cette classe d'occupation des sols.

4.2.3. Prédiction de l'occupation des sols (années 2035 et 2050)

La transformation de l'occupation des sols découle d'interactions complexes entre des facteurs à la fois physiques et humains (Oñate-Valdivieso *et al.*, 2010 ; Huang *et al.*, 2010). Les caractéristiques physiques peuvent comprendre la topographie, la météorologie, le système hydrologique, etc., tandis que les aspects humains peuvent impliquer les activités anthropiques, le réseau routier, l'urbanisation, etc. L'anticipation de scénarios d'occupation des sols peut être réalisée à travers une analyse des changements d'occupation des sols sur plusieurs périodes, ainsi que par l'étude de la relation entre ces changements et les caractéristiques physiques/humaines (variables explicatives). Le modèle de prédiction utilisé ici est Land Change Modeler (LCM) développé par Clark Lab de l'Université de Worcester aux Etats-Unis (Eastman, 2020).

4.2.3.1. Intégration des données d'entrée du modèle LCM

Les entrées du modèle LCM comprennent les cartes d'occupation des sols de 1990, 2006 et 2020, les données vectorielles sur les limites administratives, les systèmes hydrographiques et routiers. L'ensemble de ces cartes (Tableau VI) sont traités sous SIG et les cartes d'occupation des sols de 1990 et 2006 servent de fondements initiaux pour créer les cartes prédictives, tandis que celle de 2020 est utilisée comme une référence pour vérifier l'exactitude de ces cartes

prédictives. Les données vectorielles sur les limites administratives, sur les systèmes hydrographiques et réseaux routiers sont traitées comme des variables explicatives dans ce contexte et sont incorporées en tant que données d'entrée dans le sous-modèle de transition.

Tableau VI : Les entrées du modèle LCM pour la prédiction de l'occupation des sols

Type de carte	Description et source
Cartes de l'occupation des sols	Générées à partir des images Landsat (1990, 2006 et 2020)
Carte de distance aux cours d'eau	Obtenue à travers le réseau hydrographique
Carte de distance au réseau routier	Obtenue à travers le réseau routier
Carte de distance aux localités	Obtenue à travers la carte des zones urbanisées
Carte du MNT	A partir du MNT
Carte de pente	A partir du MNT

4.2.3.2. Prédiction de l'occupation des sols

La modélisation prédictive de l'évolution de l'occupation des sols repose sur la compréhension des changements spatio-temporels passés, ainsi que sur l'identification des facteurs ayant influencé ces changements et leur corrélation. Enfin, les cartes prédictives du devenir des territoires étudiés sont générées en prenant en compte divers paramètres socio-économiques, climatiques, etc. (Corgne, 2004). Les transformations passées sont initialement déduites à partir d'une suite chronologique de cartes représentant l'occupation des sols (cartes de 1990 et 2006), suivies de l'identification des facteurs les plus déterminants (variables explicatives) à l'origine de ces changements. Ces évolutions passées décrivant les variables explicatives sont ensuite combinées pour modéliser le développement de l'occupation des sols, en utilisant des méthodes telles que la régression logistique (ReLog) ou le Perceptron Multicouche (PMC). La phase suivante implique l'application de la chaîne de Markov pour anticiper l'évolution de l'occupation des sols dans le BVHBKB. Enfin, la dernière étape consiste à vérifier la validité du modèle en confrontant la carte prédictive à la réalité (carte de référence 2020) pour la même période.

4.2.3.3. Génération du potentiel de transitions de l'occupation des sols

- Création du sous-modèle de transition de l'occupation des sols

La première étape implique l'établissement du sous-modèle de transition, permettant ainsi l'intégration des variables sujettes à des changements. Deux alternatives sont présentées pour modéliser ces transitions : le Perceptron Multi-Couche (PMC) ou la Régression logistique (ReLog). Des études variées ont montré que le Perceptron Multicouche (PMC) peut produire des résultats satisfaisants, avec une précision des cartes prédictives dépassant les 85% (Dadhich

& Hanaoka, 2010 ; Nghiem *et al.*, 2011 ; Nghiem *et al.*, 2013). Toutefois, en général, les précisions des cartes prédictives obtenues par ces deux méthodes ne présentent pas de différences significatives. Par conséquent, elles peuvent être utilisées de manière interchangeable. Dans le cadre de notre recherche, l'utilisation du PMC a semblé être un choix judicieux pour trois raisons : il nécessite moins de données (Atkinson & Tatanall, 1997 ; Dadhich & Hanaoka, 2010), le volume de calcul est moindre par rapport à la ReLog, et il est plus performant dans la modélisation des transitions (Eastman, 2009).

- Évaluation de la qualité des variables explicatives

L'indice de Cramer's V et de la probabilité associée à ces variables permet de rendre compte de l'influence des variables explicatives dans la modélisation. Les variables explicatives représentent les différents éléments susceptibles d'influencer les changements dans l'occupation des sols, tels que le MNT, la pente, le réseau routier, le réseau hydrographique, etc. Un coefficient de Cramer's V élevé souligne l'importance de la variable explicative, et une valeur de 0,15 ou plus est généralement jugée acceptable, tandis que les valeurs supérieures à 0,4 sont considérées comme très satisfaisantes (Eastman, 2009). Dans le cadre de cette étude, cinq variables explicatives ont été examinées : la distance par rapport au réseau routier, la distance par rapport au réseau hydrographique, la distance par rapport aux agglomérations, le MNT et la pente.

4.2.3.4. Prédiction de l'évolution de l'occupation des sols

Dans la troisième phase du processus, les cartes prédictives de l'occupation des sols sont élaborées. Ces cartes sont conçues en utilisant les cartes de potentiels de transition (obtenues après le fonctionnement du sous-modèle de transition), en suivant deux étapes distinctes : la modélisation des changements requis et la création effective de la carte prédictive.

- Simulation des changements de l'occupation des sols

Cette phase permet de projeter la quantité de changement qui se produira à un moment précis dans le futur en utilisant le processus de prédiction de la chaîne de Markov. L'utilisation de la chaîne de Markov repose sur plusieurs hypothèses (Stewart, 1994), parmi lesquelles l'une des plus largement acceptées est de considérer l'occupation des sols et son évolution comme un processus stochastique, où les différentes catégories représentent les états d'une chaîne de Markov (Stewart, 1994 ; Griffiths, 2010). Une chaîne est semblable à un processus stochastique, si elle a la valeur (X_t) du processus à un moment t , que cette valeur ne dépend que de sa valeur (X_{t-1}) au temps $t-1$, et ne dépend pas de la séquence de valeurs X_{t-2} , X_{t-3} , ..., X_0 (les valeurs du

processus sont aux temps avant le temps $t-1$). Cette chaîne peut être exprimée comme suit (Équation 52) :

$$P\{X_t = a_j | X_0 = a_0, X_1 = a_1, \dots, X_{t-1} = a_i\} = P\{X_t = a_j | X_{t-1} = a_i\} \quad (\text{Équation 52})$$

Avec : X_0, X_1, \dots, X_{t-1} : valeurs observées dans le temps discret (0, 1, 2... $t-1$). La matrice $P\{X_t = a_j / X_{t-1} = a_i\}$ indique une probabilité de transition. Elle mesure la probabilité qu'un processus se déplace de l'état a_i à l'état a_j pendant une période de temps spécifiée. Après (L) étapes nécessaires sont effectuées pour réaliser cette transition. La matrice $P\{X_t = a_j / X_{t-1} = a_i\}$ est appelée la probabilité de transition de (L) étapes ($P_{ij(L)}$). Si la $P_{ij(L)}$ est indépendante du temps, elle ne dépend que des paramètres a_i, a_j , et (L). Suite à l'application de la chaîne de Markov pour prédire l'occupation des sols au temps $t+1$, une matrice de probabilités de transition pour ce même instant est générée. Cette matrice fournit les probabilités de changement entre les différentes catégories.

- Génération d'une carte prédictive et Validation du modèle LCM

À partir des données de transition des probabilités, une carte projetée de l'occupation des sols pour l'année 2020 dans le bassin versant du Haut Bandama est élaborée avec les mêmes classes d'occupation des sols que celles présentes sur les cartes initiales de 1990 et 2006.

La création de la carte projetée pour l'occupation des sols en 2020 dans le BVHBKB, ainsi que sa comparaison avec la carte de référence pour la même année, a permis de valider le modèle LCM. Cette validation implique l'évaluation des précisions individuelles des différentes catégories, le coefficient Kappa et enfin la précision globale de la carte projetée. Selon Landis et Koch (1997), les valeurs du coefficient Kappa entre 1 et 0,81 sont qualifiées d'excellentes, tandis que celles entre 0,8 et 0,60 sont considérées comme bonnes. Les étapes de la prédiction de l'occupation des sols réalisées à l'aide du module LCM, sont résumés dans la figure 11.

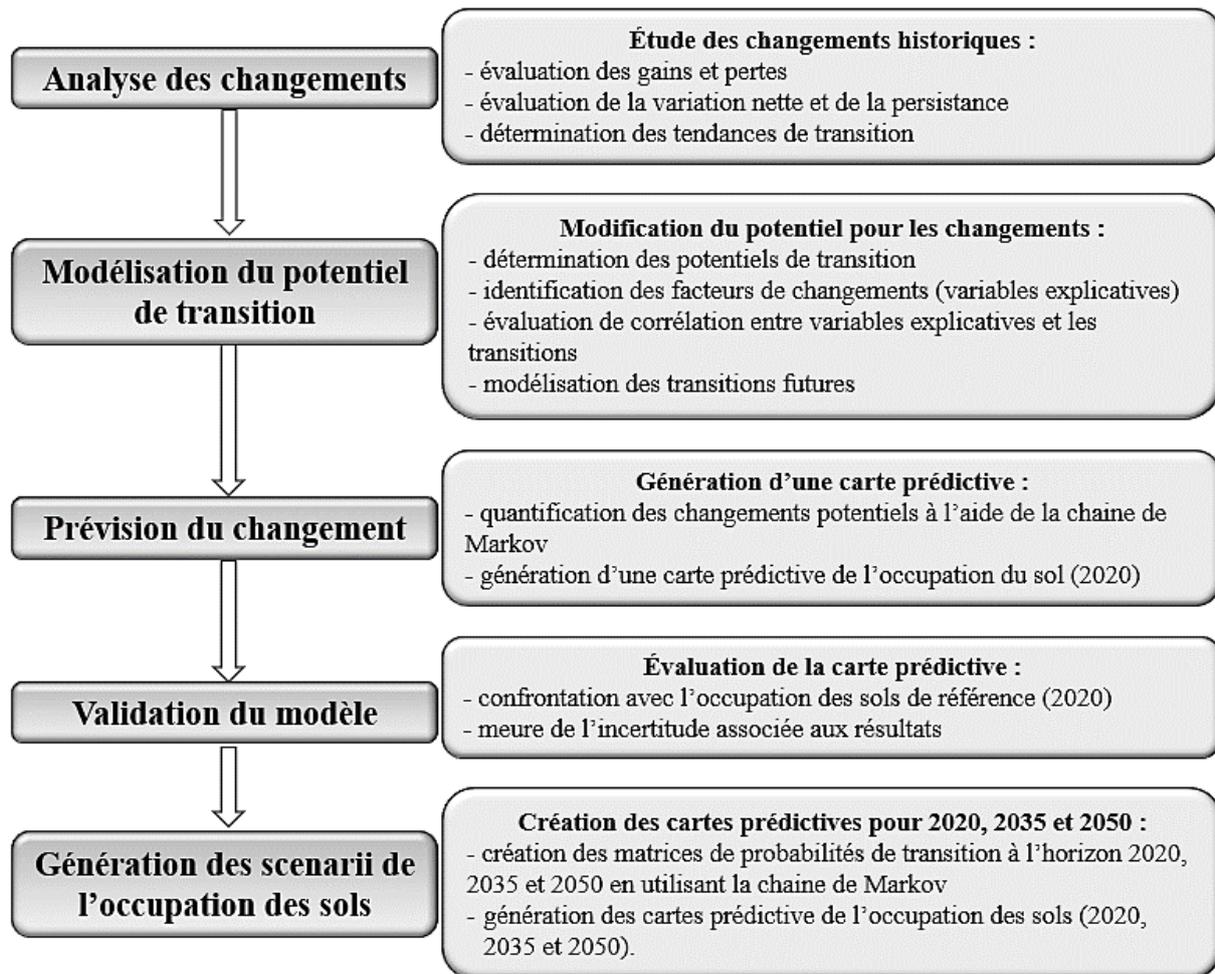


Figure 11 : Méthodologie de la cartographie de l'occupation des sols

Source : Nghiem (2014)

4.2.4. Évaluation de l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur le coefficient de ruissellement

L'étude a examiné l'influence de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol en analysant les variations du coefficient de ruissellement. Ce coefficient exprime le ratio entre l'eau ruisselée jusqu'à l'exutoire et l'eau précipitée, et il est influencé à la fois par l'état de la surface et l'intensité des précipitations. Pour cette recherche, les chercheurs ont utilisé les données des coefficients de ruissellement établis par Bouvier *et al.* (1987), Yacouba *et al.* (2002) et Sawadogo (2020) à partir d'études menées sur des bassins versants expérimentaux, en fonction des divers types d'occupation du sol. Ensuite, pour chaque type de surface, le coefficient de ruissellement approprié a été assigné en tenant compte de la connaissance approfondie de la zone d'étude. Le coefficient de ruissellement moyen annuel du bassin versant

a été déterminé en pondérant les superficies des différentes catégories d'occupation du sol dans le bassin versant, utilisant l'équation 53 (Bouvier *et al.*, 1987 ; Yacouba *et al.*, 2002) :

$$K_r = \frac{\sum K_{ri}A_i}{\sum A_i} \quad (\text{Équation 53})$$

Avec :

K_{ri} : le coefficient de ruissellement de la classe i

A_i : Superficie occupée par la classe d'occupation du sol i

K_r : Coefficient de ruissellement moyen annuel

4.3. Simulation de l'évolution des ressources en eau sur la période 2021-2050

Dans cette étude, le modèle SWAT version 2012 est couplé avec la version 10.4 de Arc-GIS (ESRI) qui est un logiciel SIG. La mise en place du modèle hydrologique SWAT se regroupe en 3 grandes phases successives que sont : la phase de prétraitement, la phase de traitement et la phase de post-traitement.

4.3.1. Choix du modèle hydrologique

Le bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha (BVHBKB) est un bassin versant fortement agricole. La modélisation agro-hydrologique offre la possibilité de simuler l'évolution de scénarios, notamment dans le domaine de l'agriculture. Elle intègre de manière dynamique l'occupation des sols, les pratiques agricoles, le cycle de l'eau et le fonctionnement des réservoirs. Pour les besoins du projet, la modélisation porte sur la simulation des processus hydrologique (Bilan hydrologique), la distribution spatiotemporelle de l'eau sur le bassin versant et le fonctionnement des réservoirs utilisés pour l'irrigation des parcelles de cannes à sucre des complexes sucrier de la SUCAF-CI.

Le modèle SWAT a été appliqué à une gamme variée de tailles de bassins versants, allant de 5,5 km² sur la Ruiné en France (Formal, 2020) et aussi de 17 km², aux USA, (Arnold *et al.*, 2012) jusqu'à plusieurs milliers de km², comme celui de la Charente en France et de Buyo en Côte d'Ivoire de plus de 24 500 km² (Vernier *et al.*, 2010 ; Koua, 2014). Il permet de simuler les effets des changements de pratiques sur la qualité de l'eau, les sédiments, les pesticides et nutriments sur le long terme dans des bassins versants complexes (types de sols et utilisation du sol variés, pratiques agricoles hétérogènes). Le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a été retenu dans le cadre de cette étude pour sa capacité à représenter assez finement les interactions entre le sol, les plantes et l'atmosphère (Arnold *et al.*, 1993 ; Santhi *et al.*, 2008). Par ailleurs, le modèle offre beaucoup d'avantages. Il s'agit de :

- la gestion intégrée de l'eau par l'évaluation de la quantité (écoulement de surface et de sub-surface, interception par les végétaux, évapotranspiration, drainage, percolation, retenues, marécages) et de la qualité (sédimentation, nutriment, bactéries et pesticides) ;
- la gestion agronomique du bassin par l'intégration des pratiques culturales, l'irrigation, les rotations de culture et l'usage des pesticides. A ce niveau, il fait la distinction entre les plantes pérennes et les plantes annuelles ;
- la réalisation des prévisions climatiques (pluie, température et neige) ;
- sa gratuité ;
- l'intégration dans ses calculs, de la gestion des eaux de surface et souterraines.

A travers ses possibilités de modification et d'ajustements de certains aspects de son code source en vue d'une adaptation aux conditions locales, SWAT permet de gérer des bassins versants hétérogènes au point de vue du paysage, de l'utilisation du sol, de la pédologie et du relief (Arnold *et al.*, 2012). Le modèle peut aussi fonctionner en l'absence de données hydrométriques. Ainsi, son couplage avec les SIG (Système d'Information Géographique) tel que GRASS® ou ArcView® est d'une grande utilité car il favorise la gestion des données de type raster, vecteur et alphanumériques. C'est donc un outil bien intégré au plan agronomique et hydrologique car sa validité a été testée sur des bassins versants à des échelles spatio-temporelles variés et aux contextes agronomiques et géologiques différents. Entre autres, il a été testé au Maroc (227 km²) par Chaponnière (2005) ; en France (302 km²) par Renaud (2004) et (385 km²) par Laurent *et al.* (2007) ; au Québec (630 km²) par Beaudin *et al.* (2006) ; en Suisse (1 700 km²) par Abbaspour *et al.* (2007) ; aux Etats Unis (4 550 km²) par Tong & Naramngam (2007) ; en Côte d'Ivoire, sur le bassin du lac Buyo (57 670 km²) par Koua, (2014), sur le bassin du lac de Taabo (60 154,26 km²) par Anoh (2014).

4.3.2. Mise en place du modèle SWAT sur le bassin versant du Haut Bandama

4.3.2.1. Phase de prétraitement

Avant de mettre en œuvre le modèle SWAT dans le BVHBKB, il est nécessaire d'adapter préalablement les données physiographiques standardisées pour l'ensemble du territoire américain. Cela implique d'ajouter ou d'ajuster certains paramètres du code source du modèle afin de le rendre conforme aux caractéristiques spécifiques de la Côte d'Ivoire en général, et du bassin versant du Haut Bandama en particulier. La mise à jour des données physiographiques a été réalisée en intégrant dans la base de données Access du modèle les valeurs préalablement saisies dans un tableur Excel.

- Préparation des données climatiques

Le fonctionnement du modèle SWAT nécessite l'utilisation de données journalières telles que la précipitation, la température maximale et minimale. Étant donné que ces données présentent souvent des lacunes sous la forme d'erreurs ou d'absences, un programme appelé Weather GENerator (WGEN) (Sharpley & Williams, 1990) a été intégré dans SWAT pour corriger ces incohérences. Lorsqu'il est configuré, le programme WGEN peut générer des données climatiques ou compléter les données manquantes en simulant des données à partir des références journalières de la station météorologique en cas d'absence (Arnold *et al.*, 2012). Il est important de disposer d'au moins 20 ans de données climatiques pour effectuer une simulation hydrologique sur SWAT.

- Base de données de sol

Toutes les données relatives aux caractéristiques physico-chimiques du sol dans le bassin versant du Haut Bandama ont été extraites sur le site de la FAO (Tableau VII, FAO, 1986).

Tableau VII : Paramètres par couche de sol requis pour caractériser les sols dans SWAT

Paramètres	Définition
SOL_Z	Profondeur de la couche à partir de la surface du sol au fond de la couche (mm)
SOL_BD	Densité apparente volumique (Mg / m ³)
SOL_AWC	Disponibilité en eau de la couche (mm (H ₂ O) / mm (sol))
SOL_K	Conductivité hydraulique à saturation (mm / h)
SOL_CBN	Teneur en carbone organique (%)
CLAY	Teneur en argile (%)
SILT	Teneur en limon (%)
SAND	Teneur en sable (%)
ROCK	Teneur en fragment rocheux (%)
SOL_ALB	Albédo du sol humide
USLE_K	Facteur K de l'équation d'érodibilité du sol
SOL_EC	Conductivité électrique (dS / m)

Après paramétrisation des données brutes conformément aux conditions locales, le modèle est prêt à être exécuté. Toutes les cartes destinées à être intégrées au modèle ont été converties en raster et projetées dans le système de coordonnées UTM-WGS 84, zone 30 de l'hémisphère Nord.

4.3.2.2. Phase de traitement ou de routage

- Délimitation des sous-bassins versants

La première étape, appelée discrétisation spatiale, implique l'extraction des limites du bassin versant topographique et de son réseau hydrographique à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Dans le cadre de SWAT, cette procédure est automatisée. La fenêtre de commande pour guider les opérations est illustrée dans la figure 12 et comprend les étapes suivantes :

- définir les données d'entrée, telles que le MNT, un masque pour limiter la zone de calcul et une couche indiquant précisément l'emplacement du réseau hydrographique pour forcer le modèle (burn in) ;
- calculer automatiquement la direction des écoulements et les pentes à partir du MNT ;
- tracer automatiquement le réseau hydrographique une fois une valeur de seuil (threshold area) entrée pour la maille de calcul ;
- positionner le point d'exutoire du bassin versant à délimiter, le sélectionner, puis exécuter la délimitation du bassin versant ;
- ensuite, délimiter le bassin versant et ses sous bassins en fonction de l'emplacement de l'exutoire précédemment placé ;
- positionnement des réservoirs (le barrage de Morrison et de Lokpoho) au niveau des sous-bassin versant concernés.

- Extraction automatique du réseau hydrographique

Après avoir spécifié un seuil (threshold area) pour la maille de calcul, le tracé du réseau hydrographique est automatiquement généré. La méthode pour déterminer le cheminement du réseau hydrographique repose sur ce seuil d'apparition de l'eau : une zone du MNT est considérée comme un potentiel cours d'eau si elle dépasse cette taille seuil. Ainsi, en diminuant la taille de cette surface seuil, davantage de petits cours d'eau sont identifiés. Après plusieurs essais visant à trouver la valeur optimale, une taille seuil de 12 500 hectares a été retenue (Figure 12). L'extraction précise du réseau hydrographique est cruciale pour garantir le bon déroulement de la simulation.

- Définition des exutoires des sous-bassins et du bassin versant principal

Pour commencer, l'utilisateur doit positionner un exutoire (outlet). À partir de là, en utilisant la matrice de direction des écoulements, SWAT identifie les zones en amont de cet exutoire où s'écoule l'eau. Le bassin formé ainsi correspond à un bassin topographique, étant donné que seule l'information d'altitude est utilisée dans le processus. Ensuite, différents points d'exutoire

sont placés en fonction du nombre de sous-bassins souhaités, parmi lesquels l'exutoire principal est choisi (Station hydrométrique Route-Korhogo-Badikaha) pour délimiter le bassin versant principal. Au total, quarante-neuf (49) sous-bassins ont été identifiés, chacun avec son cours d'eau principal (Figure 12).

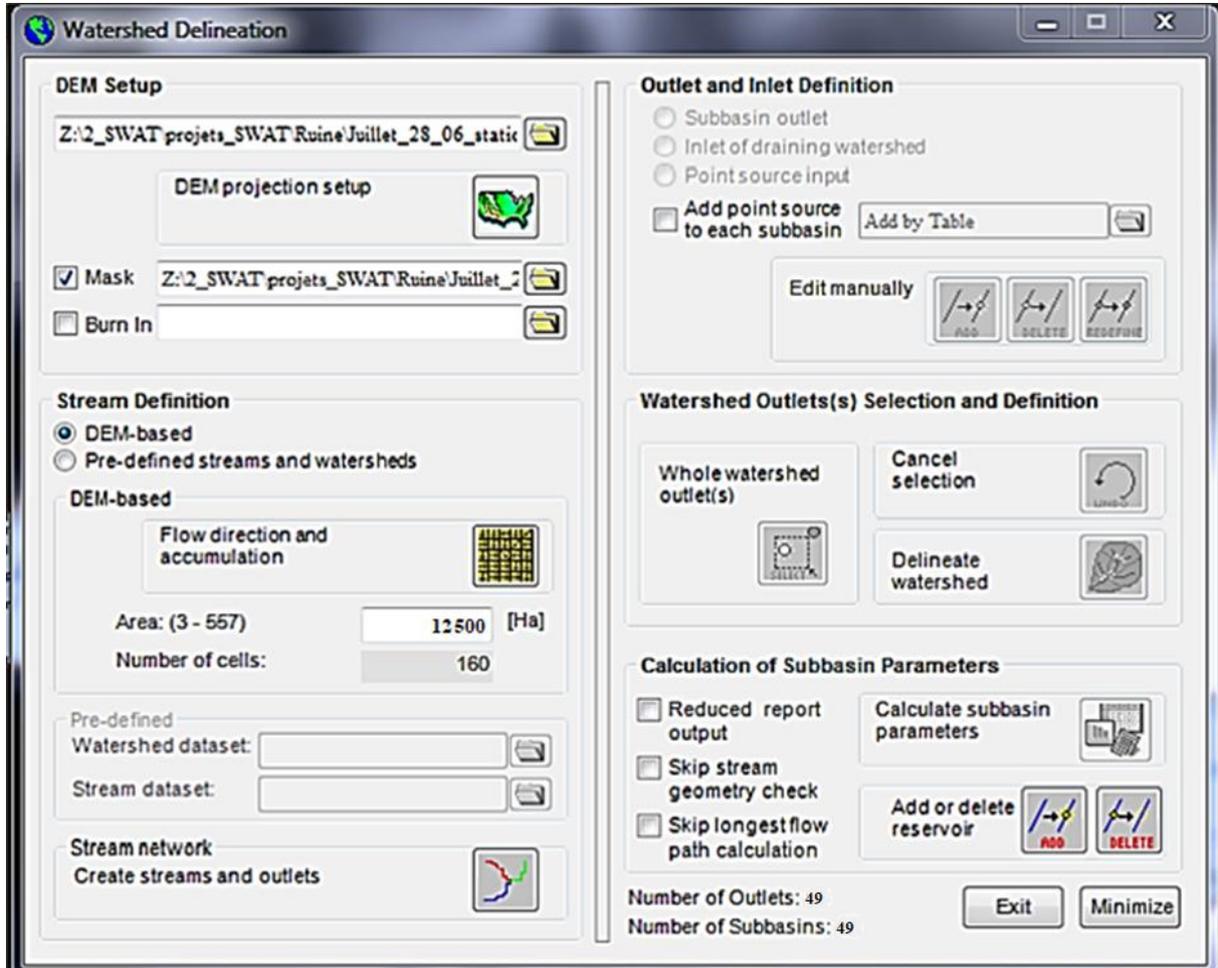


Figure 12 : Fenêtre de délimitation du bassin versant, des sous-bassins versants et du réseau hydrographique

- Intégration de la carte d'occupation des sols

Pour évaluer l'influence des aménagements du territoire sur les flux d'eau, il est impératif de caractériser les différents usages du sol. L'occupation des sols est l'un des facteurs les plus importants qui affectent les eaux de ruissellement, l'évapotranspiration et l'érosion de surface dans un bassin versant. Un reclassement des cartes d'occupation des sols a été fait par la suite pour représenter l'utilisation des sols en fonction des types spécifiques de couverture du sol en liaison avec la base de données de SWAT. Les différentes unités d'occupation de sol et les couvertures végétales sont présentées comme suit (Tableau VIII) :

Tableau VIII : Unités d'occupation des sols intégrées dans le modèle SWAT

	Classe d'occupation des sols	Définition dans SWAT	Code SWAT
1	Lambeau de Forêt	Morceau de forêt serpentant le long des cours d'eau	FRSD
2	Savane	Zone de savane	RNGB
3	Culture et jachère	Terre agricole	AGRL
4	Sol nu ou bâti	Zone urbaine	URML
5	Zone humide	Bas-fond	WETN
6	Plan d'eau	Cours d'eau et/ou étendue d'eau	WATR

- Intégration de données de sol

Tout comme la carte d'occupation des sols, la carte pédologique est la dernière donnée raster à être introduite au modèle. Une fois l'option d'affichage de cette carte exprimée (cette option peut être le nom du sol, le numéro du sol dominant dans le triangle textural ou le code de l'Etat), le modèle va établir une liaison entre les types de sols et ses caractéristiques physicochimiques existantes dans sa base de données.

- Intégration de données de pentes

Les pentes sont automatiquement calculées par SWAT en utilisant le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Une seule classe de pente est sélectionnée car il n'est pas possible de définir des pratiques agricoles différentes en fonction de la pente si celle-ci était incluse dans la définition des Unités de Réponse Hydrologique (URH).

- Découpage du bassin versant unités de réponse hydrologique

L'unité spatiale de base utilisée pour les calculs dans le modèle SWAT est l'URH. Elle est le résultat de la combinaison unique de trois éléments (occupation des sols, pédologie et pente) dans les sous bassins obtenus précédemment. Le travail accompli ici, a consisté à choisir le critère de répartition des URH. Afin d'augmenter la précision du modèle, la méthode dominante pour la discrétisation des URH pour chaque sous-bassin est retenue. Le principe consiste à définir un seuil critique en dessous duquel les composantes de l'URH ne sont pas prises en compte par le modèle. Ceci permettra de réduire le nombre de URH (soit 1 URH par sous-bassin) et par ricochet, réduire la durée des simulations (Neitsch *et al.*, 2011).

Une fois les informations nécessaires pour le croisement des données entrées, il est crucial de déterminer un seuil de précision pour la définition des URH, comme illustré par la figure 13. En mettant la valeur « 0% », le niveau le plus précis est donc établi.

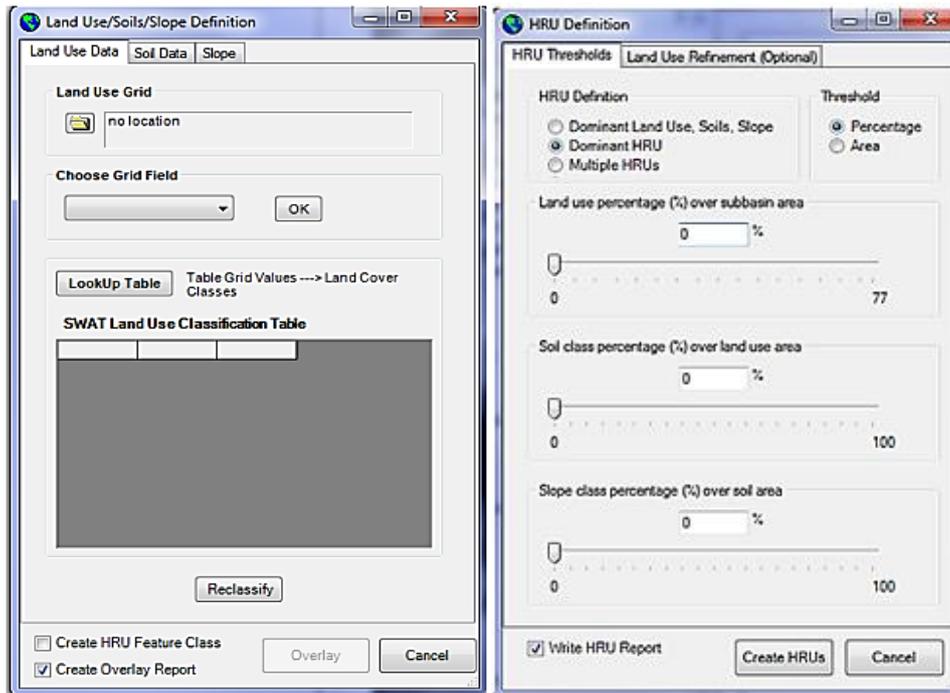


Figure 13 : Fenêtres permettant la définition des unités de réponses hydrologiques

- Intégration des données météorologiques et les données hydro climatiques

Les derniers réglages de cette phase ont concerné le mode de calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et le ruissellement. L'ETP a été définie selon la méthode de Hargreaves, le débit d'eau par la méthode de stockage variable et le ruissellement par la méthode du Curve Number (CN). Neitsch *et al.* (2011) proposent une description très détaillée (phénomènes, processus et équations) de la modélisation agro-hydrologique avec SWAT dans le manuel d'utilisation.

- les paramètres utilisés concernant le climat sont la pluviométrie, les températures minimales et maximales, la vitesse du vent, l'humidité relative et le rayonnement solaire à un pas de temps journalier ;
- les stations météorologiques sont également localisées géographiquement par leur longitude, latitude et altitude.

Pour ce projet, les chroniques de données de pluies et de températures au pas de temps journalier, recueillies sur 5 stations sont intégrées dans le modèle SWAT à partir de la fenêtre «Weather Data Definition» correspondant aux données climatiques (Figure 14).

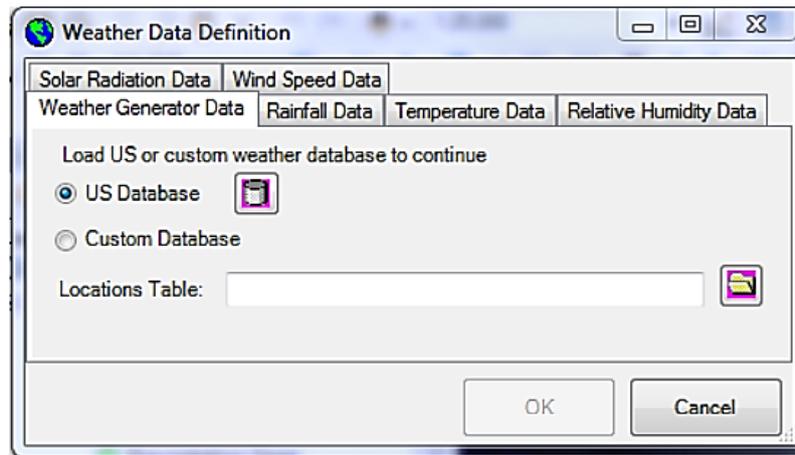


Figure 14 : Fenêtre des permettant l'intégration données climatiques

- Création des tables d'entrée du modèle/configuration du bassin versant

Les phases précédentes ont impliqué la discrétisation spatiale du bassin versant pour simplifier sa configuration. Maintenant, l'accent est mis sur la préparation des tables de données en entrée du modèle. L'objectif est de fournir au modèle toutes les informations requises, organisées et regroupées par thème dans des tables pour les calculs. La création des tables de la base de données consiste à la récapitulation des fichiers des caractéristiques physico-chimiques du bassin versant, des sous-bassins, des URH, des chenaux d'écoulement, des nappes souterraines (recharge des eaux souterraines), des sols, de la météo, de l'usage de l'eau et des pratiques culturales. La fenêtre suivante est celle qui permet d'activer ces tables (Figure 15) :

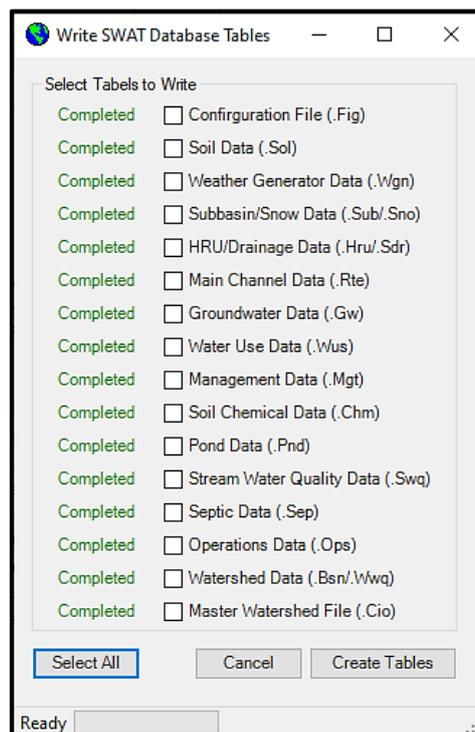


Figure 15 : Fenêtre d'activation des tables d'entrée

- Paramétrisation des réservoirs

La paramétrisation des réservoirs dans le modèle SWAT nécessite les entrées de surface et de volume d'eau correspondant aux cotes des plus hautes eaux, aux cotes des plans d'eau normal et celles des basses eaux. La surface au niveau du déversoir principal (niveau normal des eaux) et du déversoir d'urgence (niveau de stockage maximum) sont des caractéristiques cruciales du réservoir. En dessous du volume principal ou volume du plan d'eau normale (PV), aucun déversement d'eau ne se produira. Une fois que le niveau d'eau dépasse le volume d'urgence (EV), tout excès d'eau sera évacué. Lorsque la surface et le volume du réservoir sont fournis en entrée dans les sous-bassins versants dédiés, le bilan hydrique (précipitation, évaporation, flux entrant, flux sortant et percolation) est suivi de manière explicite.

Des données de débit journalières ou mensuelles (m^3/s) sont fournies sous la forme d'un fichier de débit de sortie journalier (RESDAYO) ou mensuel (RESMONO). La quantité d'eau évaporant du réservoir est calculée à l'aide de la sortie d'eau fournie (m^3/s).

SWAT estime la quantité des sédiments dans le réservoir en se basant sur le bilan massique des charges de sédiments (Équation 54).

$$Sed_{wb} = Sed_{wb,i} + Sed_{flowin} - Sed_{stl} - Sed_{flowout} \quad (\text{Équation 54})$$

où Sed_{wb} représente les sédiments dans le réservoir (tonnes), Sed_{flowin} est la quantité de sédiments entrant avec l'écoulement entrant, Sed_{stl} est le sédiment déposé dans le réservoir et $Sed_{flowout}$ est le sédiment transporté avec l'écoulement sortant du réservoir, toutes les unités étant en tonnes métriques. L'élimination des sédiments se fait par décantation, qui dépend de la quantité de sédiments fournie et de la capacité d'accumulation, constitue un élément important de l'équilibre.

- Simulation

Une fois les fichiers de calcul récapitulé par SWAT, le modèle est prêt pour les simulations. La configuration de la simulation consiste d'abord à sélectionner la période de la simulation, qui correspond ici à la période des données climatiques observé (1976-2016) ou simulée (2021-2050). Ensuite, les dernières opération et choix concernent la distribution des données climatiques, la version du programme SWAT compatible avec la configuration de l'ordinateur (32 ou 64 bits), la période de réchauffage et le pas de temps de sortie des résultats (journalière dans le cadre de cette étude). Deux (2) années dans la chronique des données ont été utilisées comme période de réchauffage du modèle (Figure 16) afin de faire tourner le modèle à vide avant la période souhaitée pour obtenir des résultats, dans le but d'éliminer certaines erreurs.

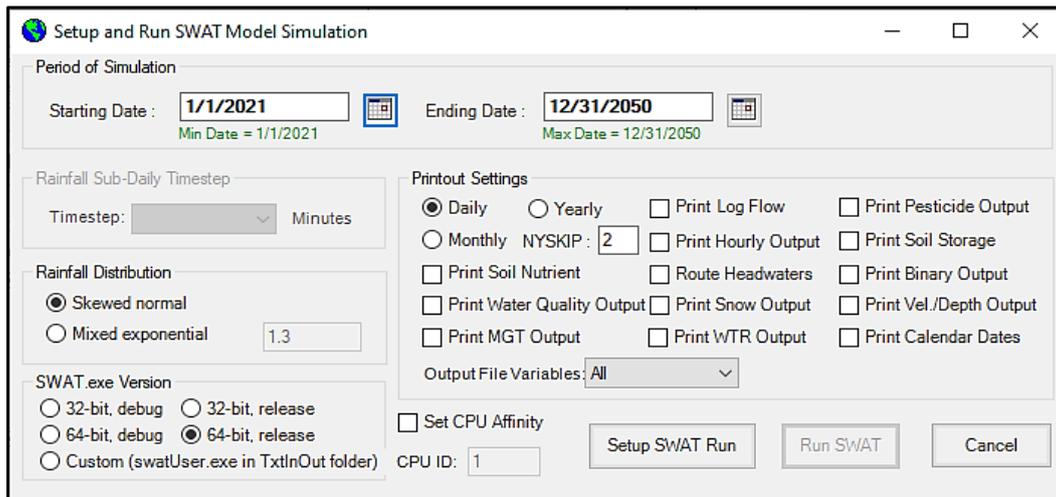


Figure 16 : Fenêtre de lancement de la simulation

La première étape consiste à sélectionner la période de la simulation, qui correspond ici à la période des données de précipitations (1976-2016). Ensuite, il est nécessaire de choisir le pas de temps, qui est journalier pour ce projet. On peut également opter pour une période de "préchauffe" (NYSKIP = 2 ans) afin Une fois la simulation terminée, la fenêtre illustrée dans la Figure 17 permet de charger et d'enregistrer les résultats de la simulation.

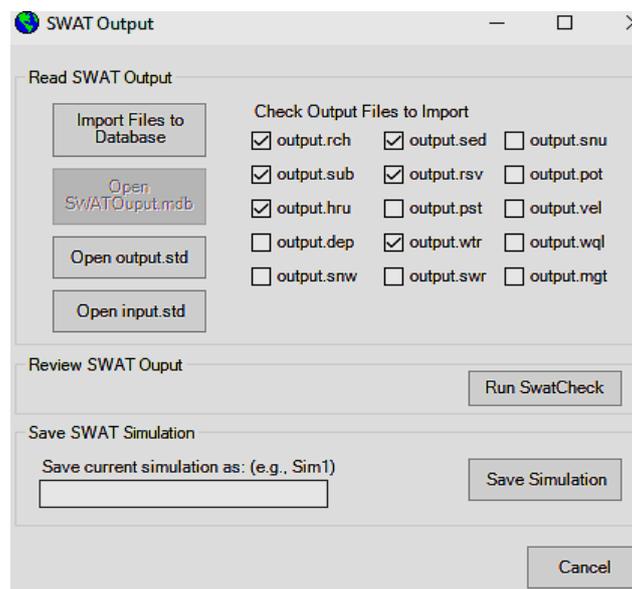


Figure 17 : Fenêtre de visualisation des résultats

4.3.2.3. Phase de post-traitement

- Analyse de sensibilité, d'incertitude et calage

Le calibrage du modèle SWAT est une tâche ardue en raison de sa complexité et du grand nombre de paramètres impliqués (629 paramètres). Par conséquent, une analyse de sensibilité est essentielle pour identifier les paramètres qui ont le plus d'influence sur les valeurs de débits

modélisées. Elle permet également de réduire le nombre de paramètres testés pour une utilisation efficace du modèle (Van Griensven *et al.*, 2006). Cette analyse permet de classer les paramètres en fonction de leur impact sur la variance de la production, ce qui aide à réduire l'incertitude et à guider le processus de calibrage du modèle. La réalisation de l'analyse de sensibilité permet également de diminuer le nombre de paramètres à tester, optimisant ainsi l'utilisation du modèle (Van Griensven *et al.*, 2006).

La sensibilité des paramètres du modèle SWAT a été analysée en utilisant l'algorithme SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting Version 2) intégré au logiciel SWAT-CUP (Soil and Water Assessment tool Calibration and Uncertainty Programs). Ce processus est réalisé en parallèle avec le calage, ce qui implique d'inclure les débits simulés par le modèle SWAT ainsi que les débits observés. Cette inclusion est essentielle, car l'évaluation de la sensibilité repose sur les variations de la fonction objectif qui mesure l'efficacité du calage du modèle. La sensibilité des paramètres est ensuite calculée à partir d'une analyse de régression multiple, comme indiqué dans l'équation 55, en associant les valeurs des paramètres obtenues par échantillonnage (Abbaspour *et al.*, 2007).

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i \quad (\text{Équation 55})$$

où g est la valeur de la fonction objectif ; b est le paramètre ; α est la constante de régression ; β correspond au coefficient technique attaché à la variable b ; et m est égal au nombre de paramètres.

La sensibilité est estimée par la moyenne des variations de la fonction objectif, obtenue en modifiant chaque paramètre individuellement, tandis que les autres restent constants. Cette sensibilité est évaluée via les valeurs de t-statistique (t-stat) et de p-valeur (p-value) : une t-stat élevée et une p-value faible indiquent une plus grande sensibilité du paramètre (Abbaspour *et al.*, 2007). La t-stat représente le coefficient de régression d'un paramètre divisé par son erreur type. Un coefficient supérieur à l'erreur type entraîne une t-stat positive, ce qui signifie que le paramètre est sensible (Abbaspour *et al.*, 2015). La p-valeur est calculée en comparant la t-stat aux valeurs de la table de distribution de Student, permettant de tester l'hypothèse nulle selon laquelle le coefficient de régression est nul. Une p-valeur inférieure à 0,05 rejette l'hypothèse nulle, indiquant que le paramètre a une influence sur la variable dépendante, avec une probabilité de 95 % qu'un changement de paramètre affecte cette dernière (Abbaspour *et al.*, 2009).

L'analyse porte uniquement sur les paramètres ajustables pour la production d'eau dans un bassin fluvial. Le logiciel SWAT répertorie ces paramètres avec leurs plages de valeurs, le

niveau d'action (bassin, sous-bassin, ou URH), le mode de variation (substitution, ajout ou multiplicatif par rapport à une valeur existante) et leur groupe d'analyse (production d'eau, apport sédimentaire, ou qualité de l'eau).

Les descriptions, propriétés physiques, et plages de variation des paramètres sont documentées par Arnold *et al.* (2012) dans le manuel de l'outil SWAT. Les paramètres sur lesquels l'analyse de sensibilité s'est effectuée sont :

- BIOMIX : Efficacité du mélange biologique
- CH_N2 : coefficient de Manning pour le canal principal ;
- CN2 : Numéro initial de la courbe de ruissellement SCS pour l'état d'humidité du sol
- GW_QMN : Seuil de profondeur d'eau dans la nappe superficielle nécessaire pour la résurgence de l'écoulement (mm) ;
- GW_REVAP : Coefficient d'évaporation de l'eau souterraine ;
- SLSUBBSN : Longueur moyenne des pentes (m) ;
- SOL_AWC : Capacité en eau disponible de la couche de sol ;
- SOL_K : Conductivité hydraulique à saturation du sol ;
- ALPHA_BF : facteur d'écoulement de base en nombre de jour
- CH_COV1 : Facteur d'érodabilité du canal ;
- CH_N1 : Valeur « n » de Manning pour les canaux des affluents ;
- CH_W2 : Largeur moyenne du canal principal ;
- RCHRG_DP : Coefficient de percolation de l'aquifère profond ;
- SOL_ALB : Albédo du sol humide ;
- SPCON : Paramètre linéaire pour le calcul de la quantité maximale de sédiments pouvant être réentraînés lors de l'acheminement des sédiments dans le canal ;
- TLAPS : Taux de chute de température ;
- GW_DELAY : Délai pour que l'eau souterraine qui transite par la nappe superficielle atteigne le cours d'eau ;
- SURLAG : Temps de réponse du bassin versant ;
- EPCO : Facteur de compensation de l'évapotranspiration pour le prélèvement des plantes ;

Quatre types de tests de sensibilité ont été menés pour évaluer l'influence de la quantité de données d'entrée (longueur des enregistrements historiques des débits et du nombre de variations de chaque paramètre dans la plage de valeur maximale et minimale (itérations) pendant l'analyse. Les tests sont les suivants :

- premier test : données de débits historiques longues (1977 à 1996) avec 300 itérations ;
- deuxième test : données de débits historiques longues (1977 à 1996) avec 100 itérations ;
- troisième test : données de débits historiques courtes (1981 à 1985) avec 300 itérations ;
- quatrième test : données de débits historiques courtes (1981 à 1985) avec 100 itérations.

Étant donné que seules les chroniques de mesures de débits sont disponibles, la calibration du modèle a été effectuée sur les débits. La figure 18 présente la fenêtre principale du module SUFI-2 de SWAT-CUP où s'effectue l'analyse de sensibilité.

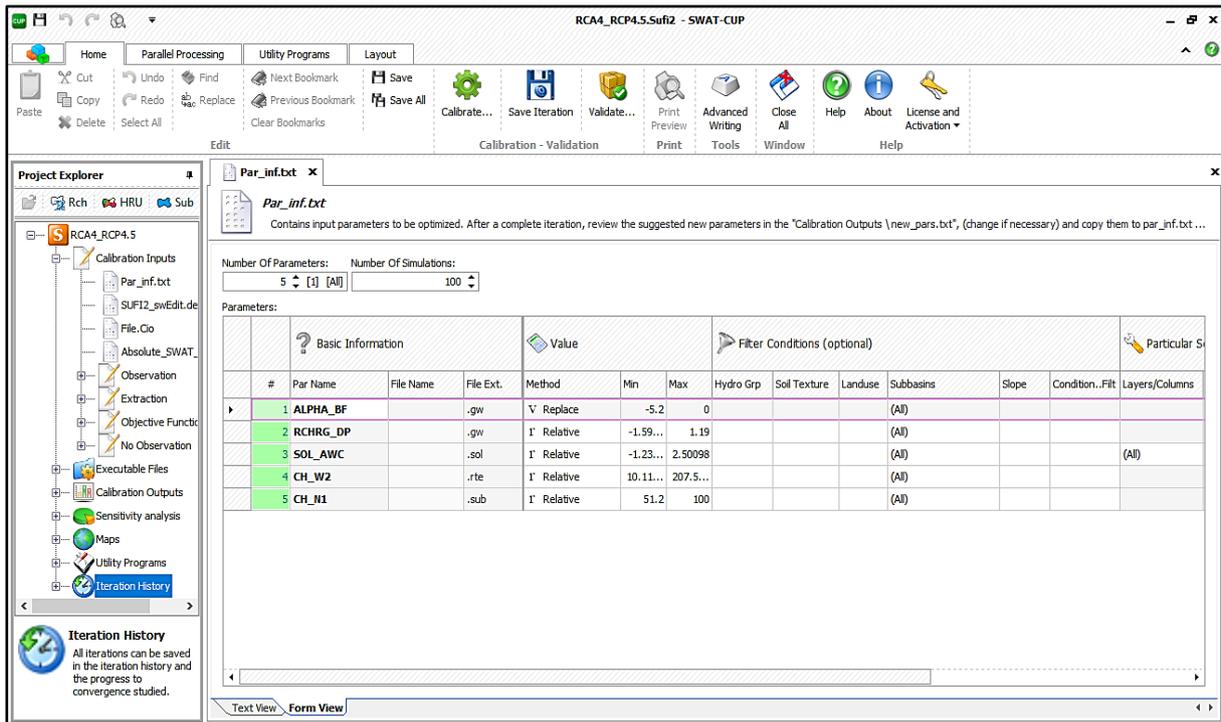


Figure 18 : Onglet principal du module SUFI-2 de SWAT-CUP

- Incertitudes

SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Version 2) est une méthode de calibration et d'optimisation largement utilisée dans les domaines de l'hydrologie et de l'environnement pour gérer l'incertitude des modèles. Cette approche repose sur l'hypothèse que l'incertitude globale d'un modèle résulte de la combinaison de plusieurs sources, notamment :

- Les imprécisions des données d'entrée.
- Les limitations inhérentes à la structure conceptuelle du modèle.
- Les erreurs associées aux paramètres et aux données mesurées.

Pour optimiser le calage, SUFI-2 propose une variété de fonctions objectif. Parmi celles-ci, le critère de Nash-Sutcliffe (NSE) et le coefficient de détermination (R^2) sont les plus

fréquemment utilisés, car ils permettent d'évaluer efficacement la qualité des simulations par rapport aux observations.

La calibration repose sur un processus itératif. Chaque itération ajuste les paramètres en fonction des performances obtenues. Dans le programme, les paramètres du modèle sont définis avec des limites minimales et maximales réalistes, afin d'éviter des valeurs non plausibles. Ces paramètres varient de manière aléatoire entre ces bornes au cours des simulations successives. L'amplitude des incertitudes diminue progressivement pour se concentrer autour du dernier ensemble de paramètres offrant les meilleures performances.

L'incertitude est quantifiée à l'aide de deux indicateurs :

- Le P-factor, qui exprime la proportion des données observées incluse dans l'enveloppe d'incertitude simulée.
- Le R-factor, qui mesure la largeur relative de cette enveloppe par rapport à l'amplitude des données observées.

Le P-factor mesure le pourcentage d'observations incluses dans la bande d'incertitude à 95 % (95PPU). Cette bande, appelée 95PPU, regroupe toutes les incertitudes associées aux paramètres du modèle, aux données utilisées et à la structure même du modèle.

Pour obtenir cette bande, un échantillonnage selon la méthode de l'hypercube latin est réalisé sur l'ensemble des paramètres inconnus. Cela permet de générer les sorties du modèle pour une multitude de combinaisons de paramètres. Le 95PPU correspond aux valeurs comprises entre les 2,5 % et les 97,5 % de la distribution cumulative des variables de sortie, offrant ainsi une représentation probabiliste des incertitudes.

Il est important de distinguer le 95PPU, qui représente un ensemble de sorties acceptables, d'un signal unique basé sur les "meilleurs" paramètres. Le but de la calibration est d'aligner au maximum les observations avec cette bande d'incertitude, maximisant ainsi le P-factor, qui peut varier de 0 % (aucune observation incluse) à 100 % (toutes les observations incluses). Un P-factor élevé indique une bonne représentation des incertitudes par le modèle.

- Calage du modèle

La calibration est effectuée sur les débits de 1981 à 1985 (période de sécheresse hydrologique) et vise à ajuster les paramètres du modèle afin de reproduire au mieux la réponse observée, c'est-à-dire les débits mesurés. Ce processus, appelé optimisation du modèle, est itératif, impliquant une variation des paramètres pour obtenir la meilleure valeur d'une fonction objective, en l'occurrence le coefficient de Nash, le coefficient de détermination (R^2) et le pourcentage de biais (PBIAS). Le coefficient de Nash, développé spécifiquement pour évaluer

l'efficacité d'un modèle, varie de -1 à 1 (Neitsch *et al.*, 2011). Plus le coefficient de Nash se rapproche de 1, plus le modèle est considéré comme calibré, indiquant une corrélation étroite entre les débits observés et simulés. Le modèle SWAT est généralement considéré comme acceptable à partir d'un coefficient de Nash de 0,65. Son calcul est réalisé de la manière suivante (Équation 56) :

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1} (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1} (Q_m - \overline{Q_m})^2} \quad (\text{Équation 56})$$

Avec, Q_m = débit observé (m^3/s), Q_s = débit simulé (m^3/s), $\overline{Q_m}$ = moyenne des débits mesurés (m^3/s) et $\overline{Q_s}$ = moyenne des débits simulés (m^3/s).

Le coefficient détermination (R^2) décrit la dispersion combinée des séries observées et simulées en comparaison des dispersions de chacune des séries. Il est compris entre 0 et 1. Lorsque sa valeur tend vers 1 cela indique une diminution de l'erreur de la variance. Une valeur supérieure à 0,5 témoigne d'une bonne correspondance entre les valeurs simulées et observées. Il est calculé par la formule suivante (Equation 57) :

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1} (Q_m - \overline{Q_m})(Q_s - \overline{Q_s})]^2}{\sum_{i=1} (Q_m - \overline{Q_m})^2 \sum_{i=1} (Q_s - \overline{Q_s})^2} \quad (\text{Équation 57})$$

Avec, Q_m = débit observé (m^3/s), Q_s = débit simulé (m^3/s), $\overline{Q_m}$ = moyenne des débits mesurés (m^3/s) et $\overline{Q_s}$ = moyenne des débits simulés (m^3/s).

Le PBIAS (Pourcentage de Biais) mesure la tendance moyenne des données simulées à être supérieures ou inférieures aux données observées. La valeur optimale du PBIAS est nulle, indiquant une parfaite simulation du modèle. Un PBIAS positif indique une sous-estimation du modèle tandis qu'un PBIAS négatif démontre une surestimation du modèle. Ce critère est recommandé à cause de sa capacité à démontrer clairement la performance du modèle (Gupta *et al.*, 1999). Le PBIAS est obtenu comme suit (Équation 58) :

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (\text{Équation 58})$$

Où, O_i représentent les valeurs de débit observés et S_i les valeurs de débits simulés.

En se basant sur des performances obtenues jusqu'en 2007, Moriasi *et al.*, (2007) ont pu établir une grille d'évaluation de la performance comme suit (Tableau IX).

Tableau IX : Critères d'évaluation de la performance de SWAT

Evaluation de la performance	NASH	PBIAS
Très bonne	$0,75 < NS \leq 100$	$PBIAS < \pm 10$
Bonne	$0,65 \leq NS \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$
Satisfaisante	$0,50 \leq NS \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$
Non Satisfaisante	$NS \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

- Validation du modèle

Cette étape consiste à vérifier si les résultats peuvent être reproduits. Pour cela, une nouvelle simulation est réalisée sur la partie restante des données mesurées, en utilisant les valeurs de paramètres calculés lors de la calibration. Ensuite, le coefficient de Nash obtenu est comparé à celui de la calibration. Ceux-ci doivent être supérieurs à une valeur de 0,65 (Abbaspour, 2013). La période choisie pour la validation est 1986-1990, soit cinq ans et constitue une période humide par rapport à la période de calage.

4.3.3. Simulation du fonctionnement hydrologique sur la période 2021-2050

Après le calage et la validation du modèle, les simulations pour l'obtention des paramètres du fonctionnement hydrologique du bassin versant à différentes périodes débutent. Les paramètres concernés sont entre autres : les paramètres du bilan hydrologique sur les périodes 1986-2016 et 2021-2050 (période future) pour chaque URH considéré en intégrant les données climatiques et de l'occupation des sols correspondant à chaque période. En plus des paramètres du bilan hydrologique, seront simulés les sédiments entrants et sortants des différentes retenues d'eau (Lokpoho et Morrisson) afin d'observer leur niveau d'envasement. Également, une simulation du modèle SWAT est effectuée en maintenant constant les paramètres climatiques et/ou de l'occupation des sols et/ou en faisant varier l'un ou l'autre de ces paramètres afin d'observer leur impact sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

4.3.3.1. Calcul des paramètres du bilan hydrologique

Après simulation et en fonction des données d'entrée dans le modèle sur une période donnée (1986-2016 ou 2021-2050), les termes du bilan hydrologique qui en découlent sont : la pluviométrie, le ruissellement, l'infiltration et l'évapotranspiration réelle.

Dans la phase terrestre de l'hydrologie, le modèle SWAT procède d'abord par diviser le bassin versant en sous-bassins puis en Unité de Réponse Hydrologique (URH). C'est donc dans ces URH que le cycle de l'eau sera reproduit de façon journalière (Thiébault, 2010). Les principaux processus impliqués dans l'évaluation de la quantité de l'eau par SWAT se composent de la

précipitation, l'évapotranspiration, le ruissellement de surface, l'écoulement subsurface ou latéral et l'écoulement souterrain (Équation 59).

$$SW_t = SW_0 + \sum(R_{day} + Q_{surf} + E_a + W_{seep} + Q_{gw}) \quad (\text{Équation 59})$$

où :

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

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

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

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

E_a = évapotranspiration totale journalière (mm) ;

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

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

Le bilan hydrique dans SWAT est décomposé en un ensemble d'échanges verticaux (évapotranspiration, infiltration et percolation (redistribution de l'eau d'infiltration dans les différentes couches de sol)) et horizontaux (écoulement de surface et hypodermique) (Neitsch *et al.*, 2005). Ainsi, durant un épisode pluvieux, l'eau est distribuée dans le bassin en trois parties. Une partie des précipitations est interceptée par le couvert végétal. La seconde partie sert à remplir les dépressions en surface. La troisième partie va s'infiltrer pour devenir une Réserve Facilement Utilisable (RFU) par les plantes et aussi alimenter les nappes souterraines. La figure 19 résume les différents processus du cycle hydrologique pris en compte dans la phase hydrologique terrestre du modèle SWAT (SWAT, 2012).

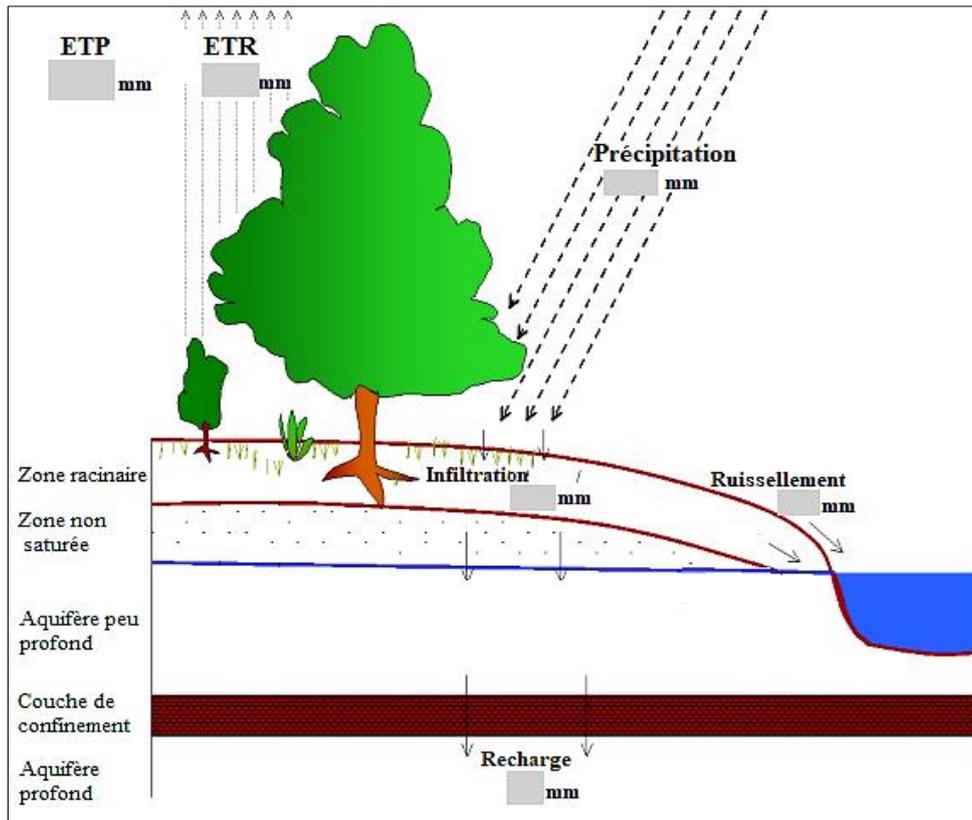


Figure 19 : Compartiments hydrologiques du modèle SWAT

4.3.3.2. Détermination des zones inondables par les pluies et crues dans les complexes sucriers de Ferkessédougou à l'aide du modèle HEC RAS

- Calage et validation du modèle HEC RAS

Le calage du modèle s'est fait avec les débits enregistrés du 01 Juillet au 31 décembre 1987 et la validation avec les débits historiques du 01 Juillet au 31 décembre 1981. Ces périodes sont choisies de sorte à faire le calage sur une période humide (01/07/1987) et la validation sur une période sèche (01/07/1981). Le calage et la validation ont été réalisés à partir d'un coefficient de Manning de $0,05 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et avec un intervalle de temps de simulation de 8 heures. Une pente sur le long de la zone à modéliser ($0,00021 \text{ m/m}$) est attribuée comme condition aux limites en aval de la zone maillée. L'ajustement entre les valeurs prédites et observées pour l'évaluation de la performance du modèle HEC RAS a été effectué à l'aide de trois fonctions : le coefficient de Nash (NTD), le coefficient de corrélation (R) et le pourcentage d'erreur (r_m) donnés respectivement par les équations 56 et 57 et 58 ci-dessus.

- Estimation des quantiles de crues et d'étiages

L'estimation des quantiles de crue repose sur l'utilisation d'un modèle de fréquence, qui décrit la dynamique statistique d'un processus. Ces modèles permettent de déterminer la probabilité

d'occurrence d'un événement avec une valeur spécifique. Les différentes étapes de cette analyse impliquent le classement des données chronologiques par ordre croissant. Les crues maximales sont ensuite calculées pour des périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans. Ce calcul est réalisé à l'aide du logiciel HYFRAN, et comprend des étapes telles que l'échantillonnage, les tests d'hypothèses et le choix du modèle d'ajustement.

- Echantillonnage

L'échantillonnage a été effectué après avoir extrait les valeurs maximales annuelles. Cette approche permet de collecter un ensemble de valeurs provenant d'une variable aléatoire, qui satisfont les conditions suivantes selon Kouassi *et al.* (2019) : les variables sont homogènes, ce qui signifie qu'elles appartiennent à une même population d'événements et les variables sont également à la fois indépendantes et stationnaires.

- Tests d'hypothèse

Après échantillonnage, l'ensemble de valeurs est soumis à une batterie de tests statistiques, notamment le test d'homogénéité, le test d'indépendance et le test de Mann-Kendall, dans le but de vérifier l'indépendance, la stationnarité et l'homogénéité, nécessaires pour un ajustement adéquat. Il est crucial de détailler les paramètres du test de comparaison en raison de son importance capitale.

- Choix du modèle d'ajustement

Il existe plusieurs approches pour sélectionner le modèle d'ajustement, telles que les considérations théoriques, la comparaison des comportements asymptotiques des lois, les pratiques locales, les tests d'adéquation et l'utilisation de divers diagrammes (Kouassi *et al.*, 2019).

Le choix du modèle fréquentiel a été réalisé à travers deux méthodes : l'approche graphique et celle des critères de comparaison (AIC et BIC). Trois modèles fréquentiels ont été pris en considération : la loi générale des valeurs extrêmes (GEV), la loi de Gumbel (EV1) et la loi de Weibull (W) pour les débits de crues et les lois Pearson type 2, Gamma et Gamma inverse pour les débits d'étiages (Catalogne, 2012). Les paramètres de ces distributions ont été estimés en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. En se basant sur ces distributions, il est possible de déterminer celle qui convient le mieux à une série temporelle de débits. L'analyse des graphiques d'ajustement montre que le modèle optimal est celui dont la courbe et l'intervalle de confiance à 95 % contiennent la majorité des points.

Pour évaluer les modèles probabilistes en fonction des critères de comparaison, on suppose que les probabilités a priori sont uniformes pour toutes les distributions. Ensuite, une période de

retour (T) est définie, et la probabilité a posteriori est calculée à partir de la probabilité a priori (Soro, 2011). Le Critère d'Information Bayésien (BIC) et le Critère d'Information d'Akaike (AIC) sont également calculés (Équation 59 et 60). Le meilleur modèle probabiliste est celui pour lequel les valeurs de AIC et BIC sont les plus basses et la probabilité à posteriori est la plus élevée (Soro, 2011).

$$AIC = -2 \log(l) + 2k \log(n) \quad (\text{Équation 60})$$

et
$$BIC = -2 \log(l) + 2k \quad (\text{Équation 61})$$

avec, l , k et n : sont respectivement la vraisemblance, le nombre de paramètre et la taille de l'échantillon.

4.4. Analyse de l'adéquation disponibilité-besoins en eau des complexes sucriers de Ferkessédougou sur la période 2021-2050

4.4.1. Évaluation de la capacité des retenues d'eau (Morrison et Lokpoho)

4.4.1.1. Bathymétrie des retenues de Lokpoho et de Morrison

L'étude de la morphologie du fond des barrages de Morrison et Lokpoho a été réalisée par l'intermédiaire des levés bathymétriques. Ces levés ont été effectués à l'aide d'un échosondeur de type Lawrence Elite 9Ti et les déplacements sur le plan d'eau ont été effectués au moyen d'un hors-bord (Figure 20). Des mesures de différentes profondeurs de la colonne d'eau ont été prises sur toute la surface des retenues où les végétaux aquatiques envahissants ne sont pas présents. Les relevés ont été effectués à l'aide d'un sonar fonctionnant à une fréquence de 455/800 kHz, ce qui permet aux signaux émis de ne pas pénétrer les vases. Les profondeurs mesurées représentent la distance entre la position du transducteur de l'échosondeur et l'interface eau-sédiment. Les relevés ont été réalisés dans les directions longitudinale et transversale du cours d'eau. La méthode d'interpolation des levés bathymétriques retenue est l>IDW (Inverse Distance Weighting). La méthode d'interpolation IDW (Inverse Distance Weighting) présente plusieurs avantages : simplicité et facilité de mise en œuvre, prise en compte de la distance, Pas de besoin de modélisation complexe, flexibilité avec les pondérations, Capacité à reproduire les valeurs connues et une large gamme d'applications. Cela en fait une technique couramment utilisée pour estimer des valeurs dans un espace à partir d'un ensemble de points de données connus (Li & Heap, 2014).

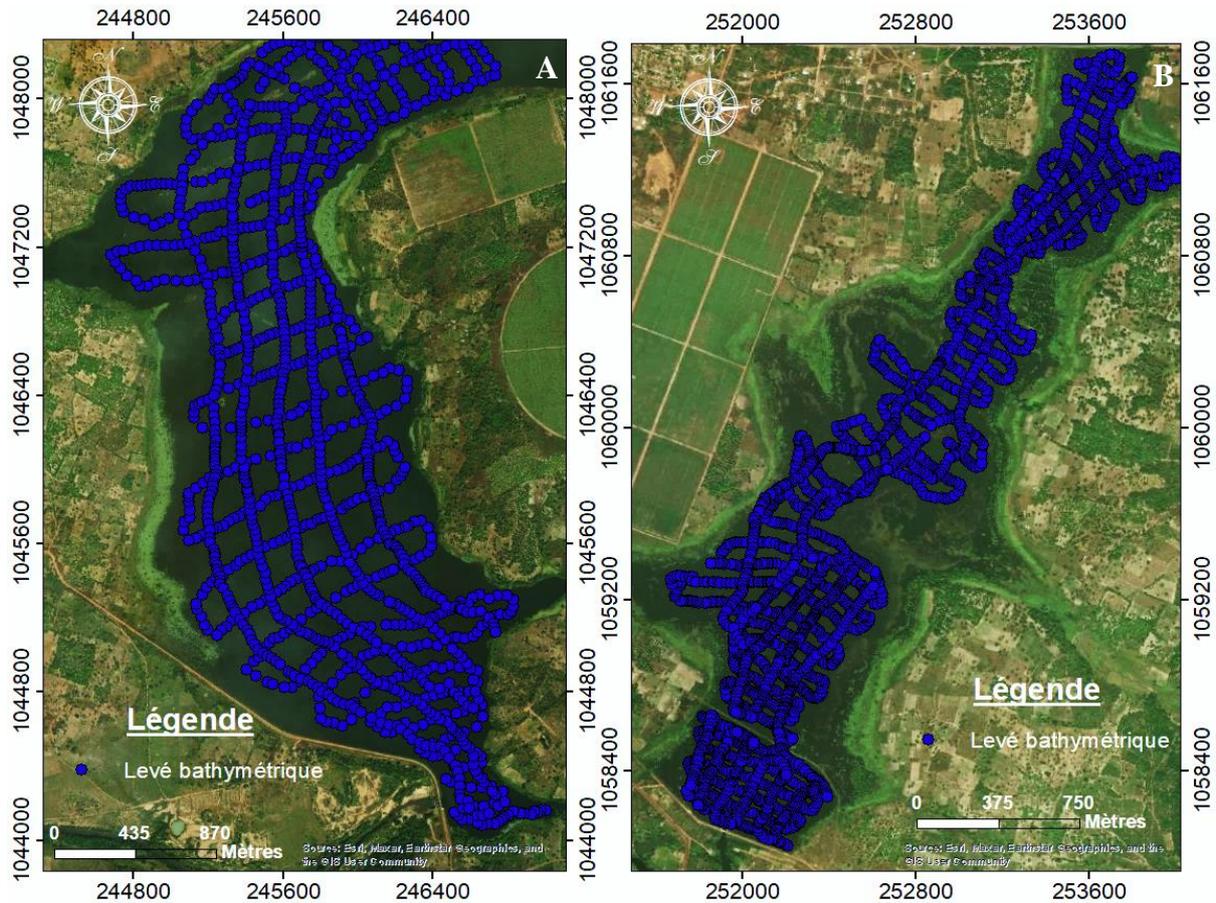


Figure 20 : Levés bathymétriques sur les plans d'eau
Retenue d'eau de Morriison (A) et Retenue d'eau de Lokpoho (B)

4.4.1.2. Détermination des courbes hauteur-surface et hauteur-volume

Les graphiques caractéristiques de la retenue (courbes hauteur-surface et hauteur-volume) illustrent les volumes d'eau et les surfaces correspondant à chaque courbe de niveau de la retenue (Kouassi *et al.*, 2019). Le volume intermédiaire V_i entre deux courbes de niveau successives est calculé à l'aide de l'équation 63.

$$V_i = \frac{(S_{i-1} + S_i) * H}{2} \quad (\text{Équation 62})$$

avec, V_i : quantité d'eau comprise entre S_{i-1} et S_i ;

H : dénivelée comprise entre S_{i-1} et S_i soit $H_i - H_{i-1}$;

S_i : surface du plan d'eau correspondant à la courbe i , (H_i) ;

S_{i-1} : aire du plan d'eau correspondant à la courbe $i-1$, (H_{i-1}).

En utilisant ces relations pour chaque niveau d'eau, on peut déduire la surface du plan d'eau en fonction de sa hauteur. Dans cette analyse, ces calculs ont été réalisés en utilisant le logiciel ArcGIS 10.4. Ainsi, sont construites les graphiques $H = f(V)$ point par point qui correspond à la courbe Hauteur-Volume de la retenue et $H = f(S)$ qui est la courbe Hauteur-Surface.

4.4.2. Disponibilité de la ressource en eau dans les réservoirs Lokpoho et Morrisson

Les débits moyens mensuels à l'entrée des réservoirs permettent d'évaluer si la quantité d'eau dont on dispose dans les cours d'eau (Lokpoho et Morrisson) est suffisante pour remplir les réservoirs. La disponibilité de la ressource en eau a été analysée par le biais de certains termes dont le débit réservé, le débit moyen mensuel et le débit prélevable. Le débit moyen mensuel en m^3/s qui constitue l'apport en eau est ramené en volume d'eau dans le réservoir après avoir retranché le débit réservé. Le réservoir est rempli lorsque le volume d'eau atteint le volume du barrage correspondant à la cote du plan d'eau normale.

4.4.2.1. Débit moyen mensuel réservé

Le débit moyen mensuel réservé ou débit minimum biologique est le débit minimal à maintenir en permanence dans un cours d'eau au droit de l'ouvrage pour sauvegarder les équilibres biologiques et les usages de l'eau en aval. Le débit moyen mensuel réservé n'est pas une notion hydrologique mais plus une contrainte réglementaire. Ce débit représente le dixième de l'apport moyen mensuel dans le cours d'eau et se calcule selon l'équation 64 (Kouassi *et al.*, 2019).

$$D_r = \frac{1}{10} \times D_{mi} \quad (\text{Équation 63})$$

avec, D_r : débit mensuel réservé en m^3/s et D_{mi} : débit moyen mensuel du mois i considéré en m^3/s qui constitue aussi l'apport en eau du mois considéré.

4.4.2.2. Débit moyen mensuel prélevable

Les volumes d'eau potentiellement prélevables sont définis de façon à ce que soit maintenu, dans le fleuve, le débit minimum biologique ou débit réservé permettant la présence de la faune et la flore dans les cours d'eau en aval. Le débit prélevable est obtenu en retranchant du module annuel le débit réservé (Kouassi *et al.*, 2019). La quantité d'eau disponible étant variable selon les mois, le débit moyen mensuel prélevable D_p et le volume moyen mensuel d'eau D_{pm} dans le réservoir sont calculés comme suit (Équations 65 et 66) :

$$D_p = D_m - D_r \quad \text{avec } D_m = \frac{\sum Q_j}{N_j} \quad (\text{Équation 64})$$

$$D_{pm} = D_p \times 3600 \times 24 \times N_j \quad (\text{Équation 65})$$

avec, D_r : débit mensuel réservé en m^3/s et D_m : débit moyen mensuel du mois considéré en m^3/s , D_p : débit moyen mensuel prélevable en m^3/s et D_{pm} : Volume moyen mensuel d'eau dans le réservoir en m^3 , Q_j : débit journalier et N_j : nombre de jour dans le mois.

Il faut noter que l'évaluation des apports en eau dans les réservoirs pour l'analyse de l'adéquation disponibilité des ressources en eau se fera à partir de la moyenne des débits issus des trois modèles utilisés (RCA4, CanESM2 et CCLM4).

4.4.3. Besoins en eau sur les retenues d'eau de Morrisson et Lokpoho sur la période 2021-2050

Les retenues d'eau de Lokpoho et de Morrisson sont utilisées principalement pour l'irrigation des deux unités de production de sucre de la SUCAF-CI. Cependant elles soutiennent aussi les besoins domestiques de la zone vie.

Les besoins en eau d'irrigation des parcelles de canne à sucre actuelle étant connus et obtenus auprès de la SUCAF-CI comme indiquée dans les données, cette partie s'attarde sur le calcul des besoins sur la période 2021-2050

- Évaluation des besoins en eau d'irrigation sur la période 2021-2050

Les besoins nets en eau sur la période 2021-2050 sont obtenue à l'aide de la méthode climatique prédictive (Gaudin, 1999). Cette approche établit une relation entre l'évapotranspiration de la culture (ETM) et l'évapotranspiration de référence moyenne (ET_{0m} issue de la moyenne des ET₀ simulées par les modèles RCA4, CanESM2 et CCLM4 sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5) à travers l'utilisation d'un coefficient cultural K_c (Équation 67).

$$B_f = ETM \times \varphi \times N_j \quad \text{Avec} \quad ETM = ET_{0m} \times K_c \quad (\text{Équation 66})$$

avec,

B_f : besoin en eau d'irrigation (m³) mensuel ;

ETM : besoin en eau d'irrigation en mm/jour/ha ;

N_j : nombre de jours ;

φ : superficie (ha) ;

ET_{0m} : Évapotranspiration de référence (mm) ;

K_c : Coefficient cultural de la canne à sucre.

4.4.4. Évaluation de l'adéquation disponibilité-besoins en eau

L'adéquation entre disponibilité en eau et les besoins en eau (RDB) est établie par une comparaison entre les demandes et la ressource disponible. En résumé, ce rapport est la différence entre la ressource en eau disponible dans les retenues et les besoins identifiés au niveau de chaque retenue d'eau (Équation 68).

$$RDB = (V_e - B_f) + \Delta S - P \quad (\text{Équation 67}),$$

avec,

RDB : adéquation disponibilité-besoin en eau, V_e : volume d'eau dans le barrage ($m^3/mois$), B_f : besoins mensuels en eau ($m^3/mois$) et ΔS la variation du stock du mois précédent.

La valeur du rapport obtenue est comparée à la quantité d'eau minimale exploitable dans la retenue. Ainsi, les besoins en eau sont dits satisfaits lorsque la valeur du rapport disponibilité-besoin en eau (RDB) est supérieur au volume d'eau minimal exploitable dans le barrage et non satisfaisant lorsque (RDB) est inférieur au volume d'eau minimal exploitable dans le barrage. L'évaluation de la disponibilité-besoin en eau est effectuée sur les débits moyens mensuels des années hydrologiques sèches récurrentes de la période 1976-2016 pour la période actuelle et de 2021-2050 pour la période future. L'analyse de l'adéquation besoin disponibilité en eau des complexes sucriers de Ferkessédougou est résumé comme suit (Tableau X) :

Tableau X : Récapitulatif de l'analyse de l'adéquation besoin-disponibilité en eau

Volume minimal exploitable (V_{min} en m^3)	Apports en eau (D_{mi})		Débits prélevables (D_p)		Volume d'eau dans le barrage (V_e)	Besoin mensuel en eau (B_f)	Volume d'eau évaporé (Ev)	Rapport disponibilité-besoin en eau (RDB)	Niveau de satisfaction
	$m^3/mois$	m^3/s	$m^3/mois$	$m^3/mois$					
Janv.	D_{mi}								
Févr.	D_{mi}								
Mars	D_{mi}								
Avril	D_{mi}								
Mai	D_{mi}								
Juin	D_{mi}								
Juil.	D_{mi}								
Août	D_{mi}								
Sept.	D_{mi}								
Oct.	D_{mi}								
Nov.	D_{mi}								
Déc.	D_{mi}								

4.5. Conclusion partielle

Les différentes méthodes appliquées aux données du BVHBKB ont permis de réaliser la simulation hydro-climatique actuelle et sur la période 2050 de la zone d'étude. Les précipitations et les températures corrigées par la méthode quantile-quantile de 3 modèles climatiques ainsi que les cartes d'occupation des sols sont intégrées dans le modèle agro-hydrologique SWAT. Ces données ainsi intégrées dans le modèle SWAT vont servir après calibration et validation dudit modèle à la simulation du comportement hydrologique du BVHBKB. Cette simulation permet de visualiser les paramètres du bilan hydrologique en vue d'une évaluation du rapport disponibilité-besoins en eau des complexes sucriers de

Ferkessédougou. Les résultats obtenus ainsi que les discussions qui en découlent font l'objet de la troisième partie.

PARTIE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 5 : CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT BANDAMA À ROUTE KORHOGO-BADIKAHA

Ce chapitre présente les résultats de l'étude de la variabilité hydro-climatique, de l'occurrence des sécheresses pluviométriques, de la caractérisation des indices extrêmes climatiques, de l'impact des extrêmes climatiques sur la production de la canne à sucre et de l'évolution des paramètres climatiques (pluie et température) sur les périodes 1986-2016 et 2021-2050.

5.1. Variabilité hydro-climatique sur la période 1986-2016

5.1.1. Analyse de la sécheresse pluviométrique

La figure 21 montre l'évolution des Indices Standardisés de Précipitations (SPI) sur la période 1986-2016 aux stations de Korhogo, Ferkessédougou, Boundiali, Tengréla et Ouangolodougou. A la station de Korhogo (Figure 21a), on observe une longue période humide de Décembre 1986 à Septembre 2000 marquée par une alternance d'humidité modérée (d'intensité 1 à 1,49). Cette période humide est suivie d'une longue période sèche d'Octobre 2000 à Mai 2012, marquée par des sécheresses extrêmes en Juin et Juillet 2006, Juin 2007 et Avril 2008 (d'intensité -2 à -2,4). On observe également une courte période humide de Juin 2012 à Juillet 2015 avec de fortes humidités d'Avril à Mai 2013 et de Novembre 2014 à Juin 2015 (d'intensité 1,5 à 1,86). A partir d'Août 2015 on assiste à une reprise de périodes sèches.

La station de Ferkessédougou a un régime beaucoup plus alterné par de courtes périodes humides et sèches (Figure 21b). Mais, de façon générale, on observe deux (2) périodes sèches. La première, de Janvier 1986 à Juin 1998, est marquée par des sécheresses extrêmes de Novembre à Décembre 1993 et, en Mars et Juillet 1996 (d'intensité -2 à -2,5). La deuxième période sèche part d'Octobre 2012 à Décembre 2018 marquée par une sécheresse intense en Juillet 2014. La seule et longue période humide part de Juillet 1998 à Septembre 2012 avec des humidités extrêmes en août et septembre 2011 et d'Avril à Juillet 2012 (d'intensité 2 à 2,5).

A la station pluviométrique de Boundiali (Figure 21c), on observe une alternance de périodes humides et de périodes sèches de Janvier 1986 à Janvier 2011 avec des piques de sécheresse extrême en 1983. Cette période mixte est suivie d'une sécheresse intense à partir de Février 2011 à Décembre 2016.

Tengréla a connu une période humide de Janvier 1986 à Juillet 1993. A la suite de cette période jusqu'en 2016, on assiste à une période sèche marqué par des sécheresses extrêmes de Mars 2000 à Décembre 2014 (Figure 21d).

La station de Ouangolodougou montre une alternance de période sèche et humide. Cependant la période de Janvier 1986 à Mars 1998 est plus humide tandis que la période qui suit (Avril

1998 Décembre 2016) est une période sèche marquée par des sécheresses extrêmes en 1999, 2010 et 2014 (Figure 21e).

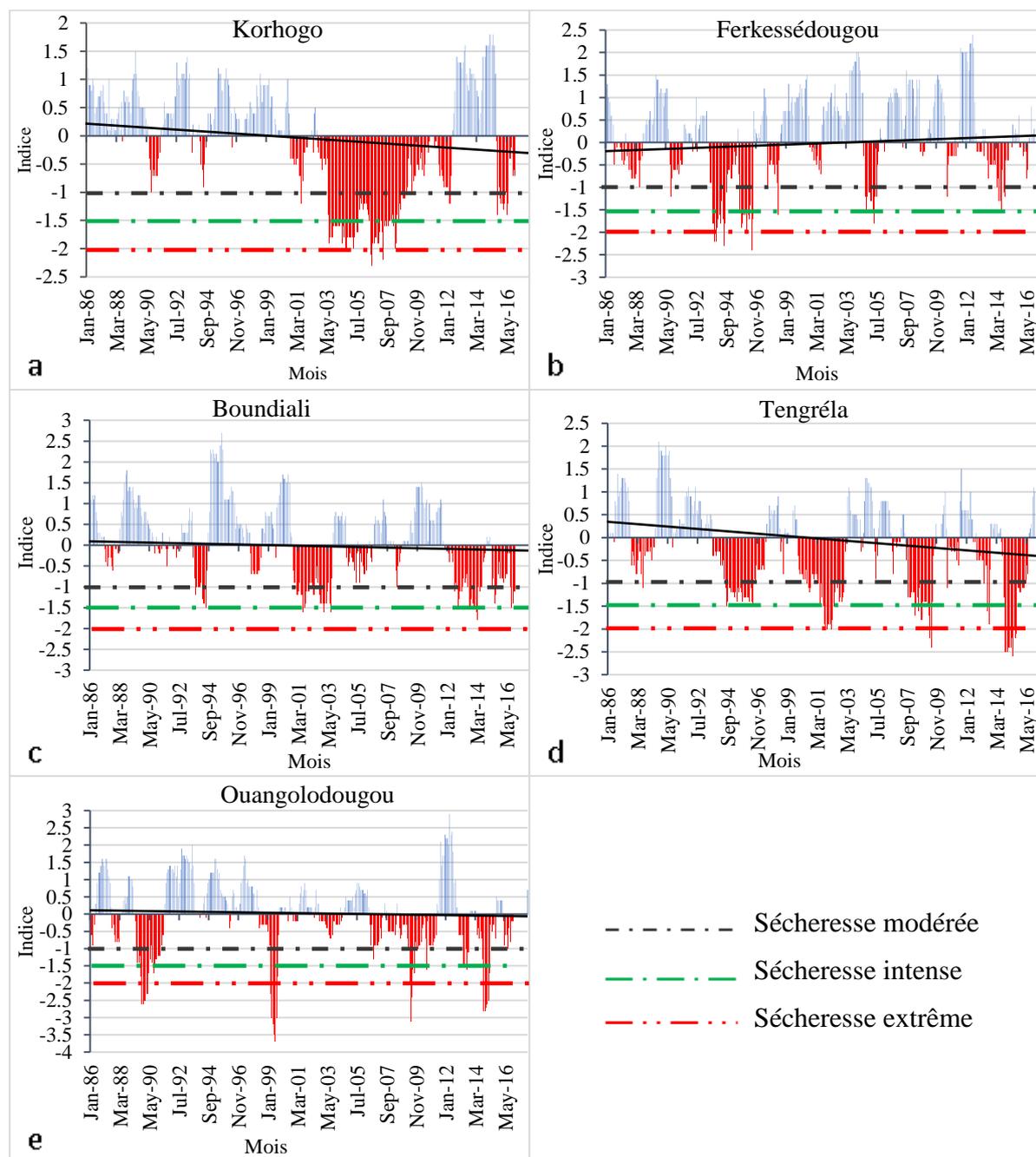


Figure 21 : Évolution mensuelle des indices de sécheresse pluviométrique dans les différentes stations sur la période 1986-2016

Korhogo (a), Ferkessédougou (b), Boundiali (c), Tengréla (d) et Ouangolodougou (e)

5.1.2. Analyse de la sécheresse hydrologique

L'analyse de la sécheresse hydrologique révèle un schéma d'alternance entre des phases de sécheresse et d'humidité, comme illustré à la figure 22. On note deux brèves périodes sèches entre 1989 et 1990, puis de 1991 à 1993. À partir de 1991 jusqu'en 1999, on observe une reprise des débits sur le bassin versant, suivie d'un déficit hydrologique plus accentué entre 1999 et 2014, avec des indices SDI parfois aussi bas que -1,5 à -2,13, signe d'une sécheresse extrême. L'année 2004 se distingue comme étant la plus sévère en termes d'intensité de sécheresse hydrologique, avec un SDI atteignant -2,13. Malgré cela, cette période est ponctuée par de brèves périodes humides.

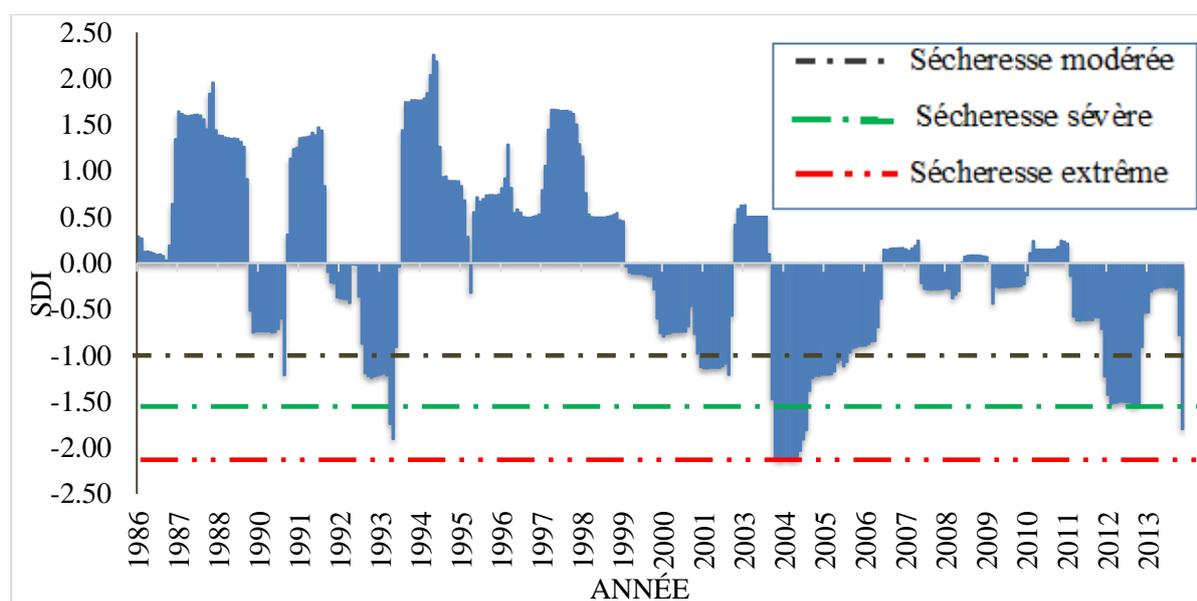


Figure 22 : Évolution des indices de sécheresse hydrologique à la station hydrométrique de route Korhogo-Badikaha de 1986 à 2016.

5.1.3. Influence de la sécheresse pluviométrique sur les débits sur la période 1986-2016

L'analyse comparative des indices SPI et SDI (Figure 23) met en évidence une relation entre les indices de sécheresse pluviométrique et hydrologique. En général, la sécheresse météorologique a conduit à une diminution des débits sur toute la période étudiée, sauf pendant la période de 1994 à 2001 où l'évolution des deux indices a été divergente. La superposition des indices pluviométriques (SPI) et hydrologiques (SDI) indiquent une bonne corrélation entre les deux indices avec un coefficient de corrélation de 0,56.

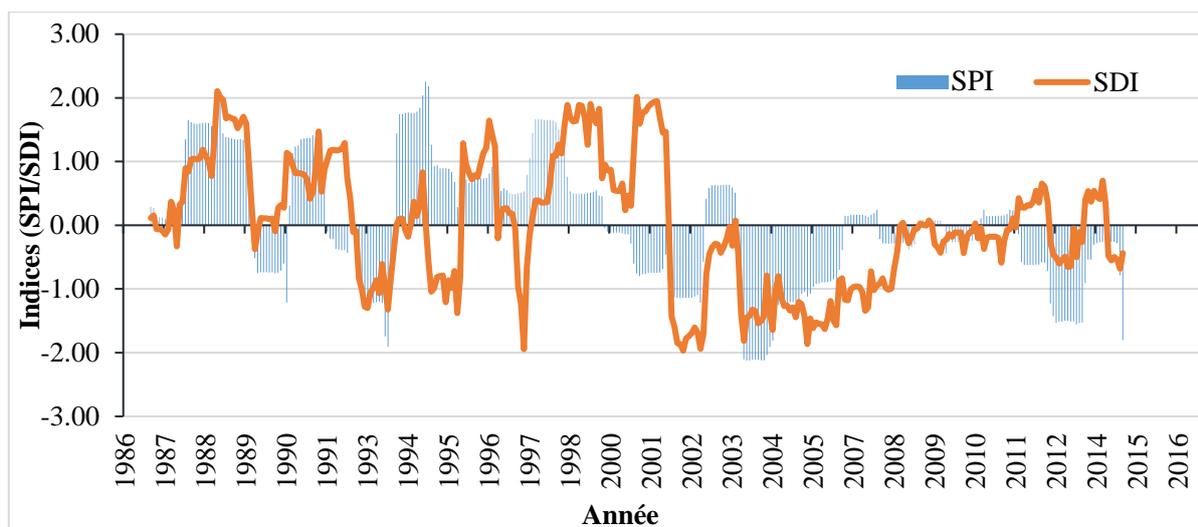


Figure 23 : Influence de la sécheresse pluviométrique sur les débits sur la période 1986-2016.

5.1.4. Analyse des débits d'été

5.1.4.1. Distribution de probabilité des étiages

Le rang des lois de probabilité adaptées aux séries des débits d'étiages montre que selon le critère d'évaluation, c'est la distribution de la loi Gamma Inverse qui offre un ajustement optimal pour le débit du fleuve Bandama (Tableau XI). Cette distribution a été classée en première position parmi les distributions Gamma et de Pearson type 2, lors de la compétition basée sur la plus grande probabilité à posteriori ($P(M_i/X) = 64,56$) ainsi que les valeurs les plus basses des critères AIC (-16,7) et BIC (-19,7). La distribution Gamma arrive en deuxième position avec une probabilité à posteriori de $P(M_i/X) = 35,44$ et des valeurs de critères AIC (-15,5) et BIC (-15,5). Enfin, la distribution de Pearson type 2 se classe en dernière position avec une faible probabilité à posteriori de $P(M_i/X) = 18,3$, et des valeurs de critères AIC (-14,7) et BIC (-14,9) plus élevées.

Tableau XI : Comparaison des lois d'ajustement des débits d'étiage à la station route Korhogo-Badikaha

Loi statistique	Nombre de paramètres	P(Mi/x)	Critère		Classement
			BIC	AIC	
Gamma inverse	2	64,56	-16,7	-19,7	1
Gamma	2	35,44	-15,5	-15,5	2
Pearson type 2	3	18,3	-14,9	-14,7	3

5.1.4.2. Estimation des quantiles d'étiages

Les débits d'étiage déterminés sont estimés selon les périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans (Tableau XII). On observe que les débits estimés par la loi Gamma inverse varient entre 0,0213 m³/s et 0,127 m³/s pour les périodes de retour de 100 ans et 2 ans, respectivement.

Tableau XII : Débits d'étiage pour diverses périodes de retour de débits à la station route Korhogo-Badikaha.

Période de retour (ans)	Probabilité de non dépassement (q)	Débits (m ³ /s) avec Gamma inverse
100	0,01	0,0213
50	0,02	0,0249
10	0,10	0,0412
2	0,50	0,127

5.1.5. Occurrence des sécheresses annuelles de 1986 à 2016

5.1.5.1. Analyse de la succession des années sèches et humides à partir du processus de Markov d'ordre 1

Les probabilités de succession des années sèches et humides (Tableau XIII) montrent que les plus fortes probabilités (supérieure à 0,51 qui est la probabilité moyenne d'observer un évènement sec) de deux années successives sèches (SS) sont observées dans les stations de Korhogo, Boundiali et Tengréla (respectivement 0,71, 0,52 et 0,63). Cependant, la probabilité d'obtenir deux années humides (HH) est relativement faible sur l'ensemble des stations exceptée la station de Korhogo (0,68). Pour l'ensemble des stations, la probabilité d'avoir une année sèche après une année humide (HS) et celle d'obtenir une année humide après une année sèche (SH) sont relativement faibles, sauf à la station de Ferkessédougou où la probabilité est de 0,67 pour HS.

Tableau XIII : Probabilité de succession de deux (2) années sèches et/ou humides de 1986 à 2016

Station	SS	SH	HS	HH
Korhogo	0,71	0,29	0,27	0,68
Ferkessédougou	0,48	0,48	0,67	0,33
Boundiali	0,52	0,43	0,48	0,52
Tengréla	0,63	0,38	0,43	0,50
Ouangolodougou	0,50	0,50	0,44	0,50

SS = deux années successives sèches, SH = une année sèche suivie d'une année humide, HS = une année sèche précédée d'une année humide, HH = deux années successives humides.

5.1.5.2. Analyse de la succession des années sèches et humides à partir du processus de Markov d'ordre 2

Le tableau XIV montre les probabilités de succession des années sèches et humides selon le processus de Markov d'ordre 2. La probabilité d'obtenir une année sèche après deux années sèches est relativement élevée (supérieure à 0,53 qui est la probabilité moyenne d'observer un évènement sec) pour les stations de Korhogo (de 0,80) et Tengréla (de 0,60). Par contre, elles sont beaucoup plus faibles au niveau des stations de Ferkessédougou, Boundiali et Ouangolodougou (respectivement 0,42, 0,36 et 0,43). Le tableau XIV montre également que si deux années successives sont sèches, la probabilité d'avoir une troisième humide est faible aux stations de Korhogo, Ferkessédougou et Tengréla (respectivement 0,20, 0,50, et 0,40) mais légèrement élevé au niveau des stations de Boundiali et Ouangolodougou (respectivement 0,55 et 0,57). La probabilité d'obtenir deux années sèches après une humide (HSS) est élevée dans l'ensemble des stations. Cependant, après une année humide suivie d'une année sèche, la probabilité d'avoir une année humide (HSH) est faible sur l'ensemble BVHBKB.

Tableau XIV : Probabilité de succession de trois (3) années sèches et/ou humides de 1986 à 2016

Station	SSS	SSH	HSS	HSH
Korhogo	0,80	0,20	0,50	0,50
Ferkessédougou	0,42	0,50	0,50	0,50
Boundiali	0,36	0,55	0,70	0,30
Tengréla	0,60	0,40	0,67	0,33
Ouangolodougou	0,43	0,57	0,57	0,43

SSS =trois année successives sèches, SSH = deux années successives sèches suivies d'une année humide, HSS = deux années successives sèches précédées d'une année humide, HSH = une année sèche précédée d'une année humide et suivie d'une année sèche.

5.1.6. Variabilité spatiale de la sécheresse

L'analyse de la répartition spatiale de la sécheresse sur la période 1986-2016 concerne la succession des années sèches à travers les matrices de Markov d'ordre 1 et 2.

5.1.6.1. Variabilité spatiale de la sécheresse à partir du processus de Markov 1

La figure 24 montre la répartition spatiale de deux années successives sèches sur la période 1986-2016. Durant cette période, la probabilité d'avoir deux années sèches successives est élevée sur plus de la moitié du BVHBKB. Le Sud du BVHBKB (zone de Korhogo), le Centre (zone de N'ganon) et le Nord du bassin (zone de M'bengué) sont les plus concernés (probabilités ≥ 53 %) par la sécheresse de deux années successives sèches. La zone du complexe

sucrier Ferké 1 et Ferké 2 présente de faibles probabilités d'apparition de deux années successives sèches (probabilités ≤ 53 %).

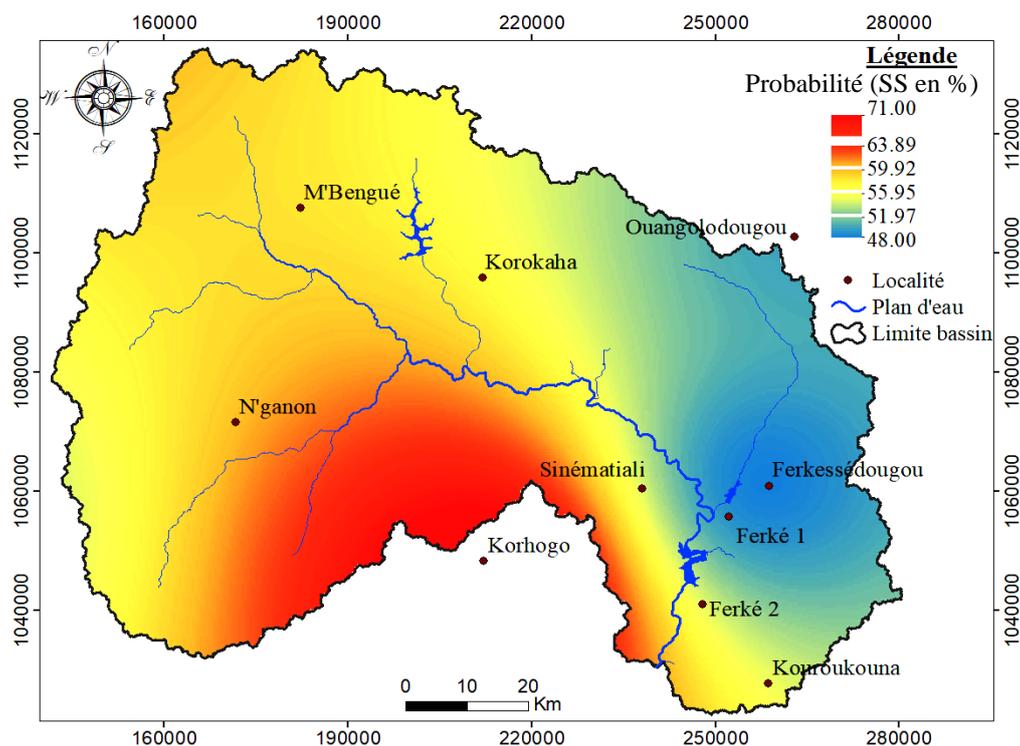


Figure 24 : Carte de la variabilité spatiale de deux années successives sèches sur la période 1986-2016

5.1.6.2. Variabilité spatiale de trois années successives sèches (processus de Markov 2)

La figure 25 montre la répartition spatiale de trois années successives sèches sur la période 1986-2016. Sur cette figure, la couleur bleue montre les zones de faible probabilité et la couleur jaune à rouge montre les zones de probabilité élevée. La probabilité d'obtention de 3 années successives sèches est élevée (probabilité ≥ 53 %) dans le Sud du bassin versant du Haut Bandama. Le Centre et le Nord sont également touchés par les sécheresses de trois années successives sèches. La zone du complexe sucrier (Ferké 1 et Ferké 2) ainsi que l'Ouest du bassin versant présentent de faible probabilité d'apparition de trois années successives sèches (probabilités ≤ 53 %). Cependant la succession de trois années sèches successives est moins étendue sur l'ensemble du bassin versant.

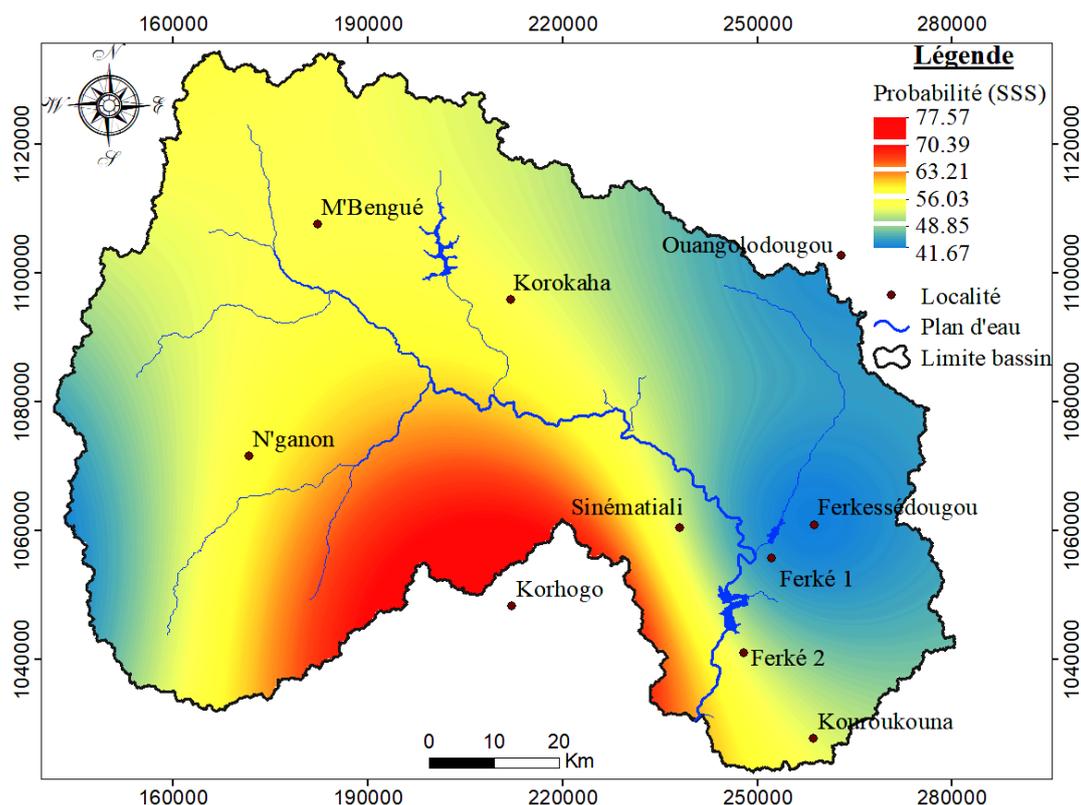


Figure 25 : Carte de la variabilité spatiale de trois années successives sèches sur la période 1986-2016

5.1.7. Période de retour de la sécheresse

Le tableau XV montre les périodes de retour des épisodes secs de longueur un à sept années après une année sèche. Le retour à un nouvel épisode sec est plus court à Korhogo et Tengréla allant de 4 ans à environ 30 ans à Korhogo et de 4 ans à environ 80 ans à Tengréla selon la longueur de la sécheresse. Les sécheresses de longueur supérieure ou égale à 5 années sont centenaires aux stations de Ferkessédougou, Boundiali et Ouangolodougou.

Tableau XV : Période de retour des séquences sèches

Longueur de la sécheresse (en année)	1	2	3	4	5	6	7
Stations de Korhogo	4,01	5,62	7,87	11,01	15,42	21,58	30,22
Stations de Ferkessédougou	6,36	13,25	27,61	57,52	119,83	249,64	520,09
Stations de Boundiali	6,13	11,69	22,32	42,62	81,36	155,32	296,53
Stations de Tengréla	4,80	7,68	12,29	19,66	31,46	50,33	80,53
Stations de Ouangolodougou	8,57	17,14	34,29	68,57	137,14	274,29	548,57

Les sécheresses de 2 années successives sèches ont pour période de retour 6 et 8 ans au niveau des stations de Korhogo et Tengréla et de 17 ans environ sur les autres stations. Ceux de 3 années successives surviennent en moyenne tous les 8 et 12 ans au niveau des stations de Korhogo et Tengréla respectivement. Sur l'ensemble des stations, les périodes de retour

évoluent de façon exponentielle pour les sécheresses de durée supérieure à 5 années sur la période 1986-2016 (Figure 26).

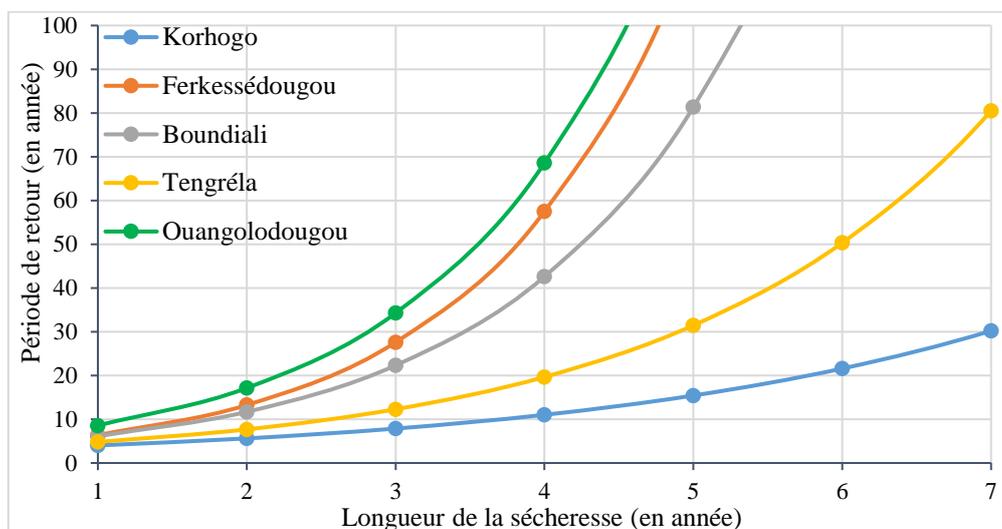


Figure 26 : Évolution des périodes de retour des séquences de sécheresses

5.1.8. Redéfinition de la saison agricole dans les complexes sucriers de Ferké

La figure 27 présente l'évolution décadaire de l'ETP et de la pluviosité dans le complexe sucrier de Ferkessédougou. L'analyse de cette figure montre que la saison humide pour la culture de la canne à sucre comme définie dans la méthodologie, part de A_2 (2^{ème} décade du mois d'Avril) où la pluviosité est supérieure à $\frac{1}{2}$ ETP à C_2 (la moitié de la 2^{ème} décade du mois de Décembre) où les pluies commencent à se faire rares. L'ensemble des intersections entre la courbe de pluviosité et celle de l'ETP, déterminent la position d'événements de nature bioclimatique. Ainsi, les événements remarquables A_2 , B_1 , B_2 et C_2 divisent la saison humide en trois périodes distinctes.

- A_2B_1 = période pré-humide : la pluviosité p est inférieure à l'ETP et supérieure à la moitié de l'ETP ($\frac{1}{2} ETP < P < ETP$). Cette période est propice pour les semis ou la mise en terre des boutures et s'étend de la moitié de la 2^{ème} décade du mois d'Avril à la moitié de la 2^{ème} décade du mois de Mai.
- B_1B_2 = périodes humides : la pluviosité est supérieure à l'ETP ($P > ETP$). Cette période est propice à la phase de croissance ou reproductive des plantes qui s'étend de la moitié de la 2^{ème} décade du mois de Mai à la fin du mois d'Octobre.
- B_2A_2 = périodes post-humides : la pluviosité est inférieure à l'ETP. Cette période où les pluies se font rares est propice à la maturation de la canne.

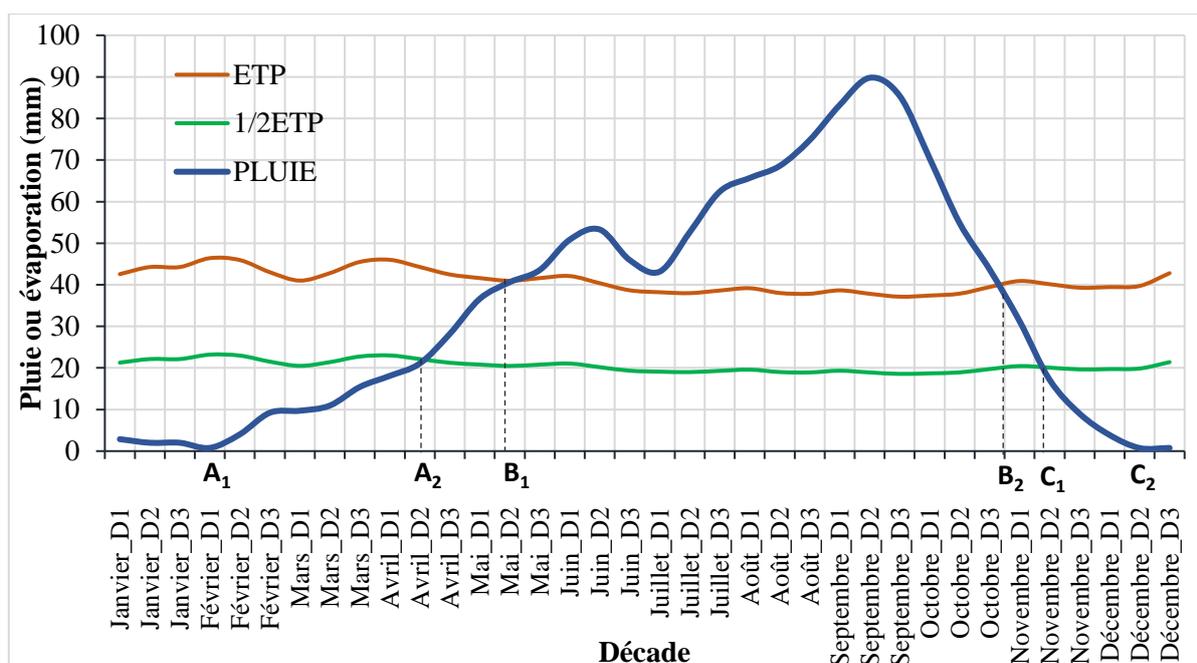


Figure 27 : Identification de la saison agricole dans le complexe sucrier de Ferkessédougou (1986-2016)

5.2. Caractérisation des indices extrêmes de changement climatique

5.2.1. Tendances des indices de précipitations sur la période 1986-2016

5.2.1.1. Évolution des totaux annuels de précipitations

La figure 28 présente l'évolution des totaux de précipitations annuelles (PRCPTOT). La droite de tendance linéaire (avec une pente d'environ -7 à Boundiali et -5 à Korhogo et environ 3 à Ferkessédougou) indique la tendance des hauteurs annuelles de pluie. La tendance de l'indice PRCPTOT est en régression aux stations de Boundiali et Korhogo respectivement de 7 et 5 mm/an. Ainsi les pluies baissent de 70 mm par décennie à Boundiali et de 50 mm par décennie à Korhogo. De ce fait, en 31 ans, elles ont diminué de 217 mm à Boundiali et de 155 mm à Korhogo. En outre, les plus faibles cumuls de pluies sont enregistrés en 2013 (958,3 mm) à Boundiali et 2009 (743,9 mm) à Korhogo.

A la différence des stations de Boundiali et Korhogo, les totaux annuels des précipitations à la station de Ferkessédougou est en augmentation. La droite de tendance (avec une pente de 3) indique une hausse des PRCPTOT de 3,165 mm/an soit 31,65 mm par décennie. Ainsi, en 31 ans, les pluies au niveau des complexes sucriers de Ferkessédougou ont augmenté de 93 mm. Les plus faibles hauteurs de PRCPTOT sont enregistrées en 1993 (825 mm) et en 1995 (901 mm) à la station de Ferkessédougou.

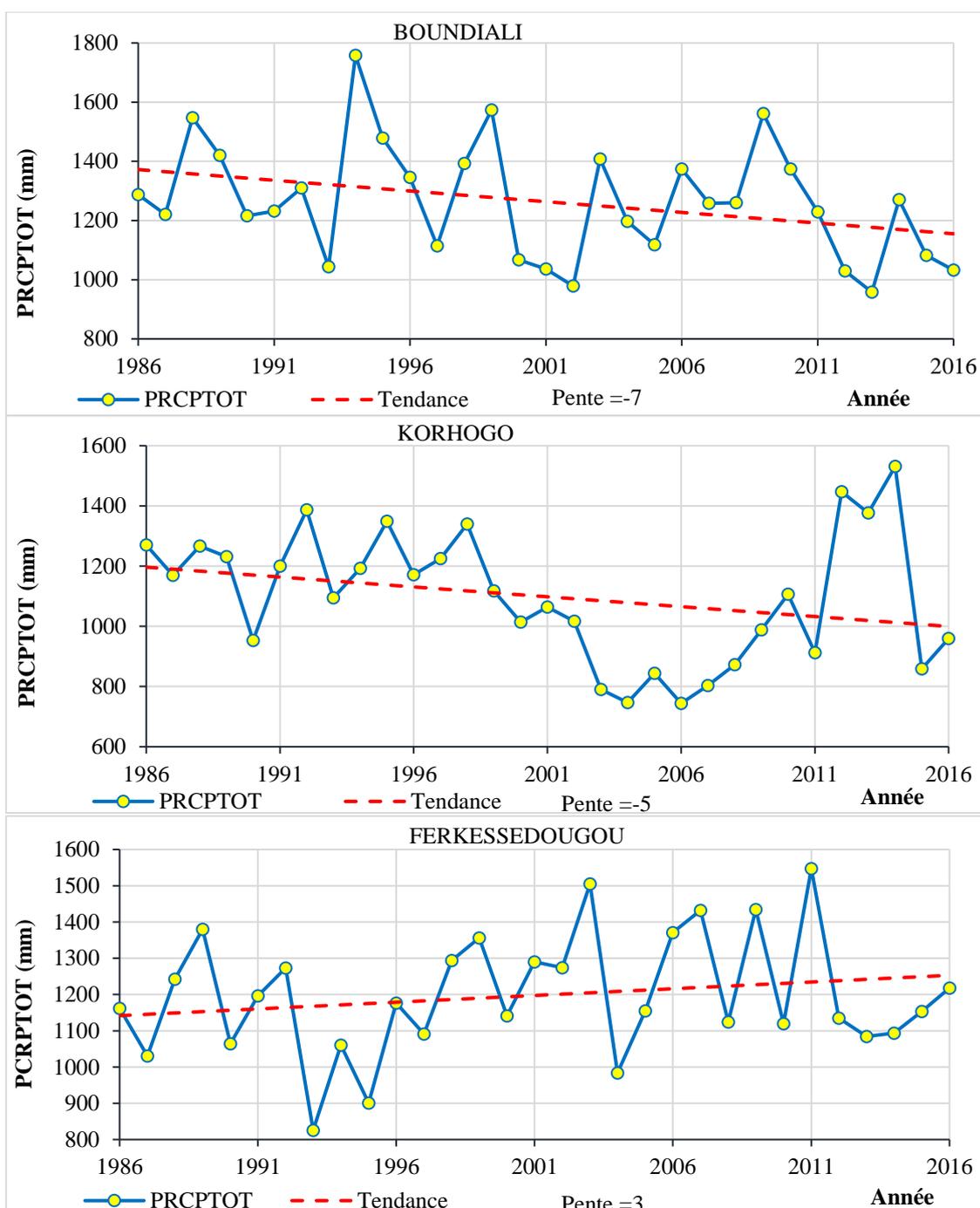


Figure 28 : Tendances des indices des totaux annuels de précipitations

5.2.1.2. Évolution des jours consécutifs humides

La figure 29 présente l'évolution du nombre de jours consécutivement pluvieux (CWD) dans le BVHKB. La droite de tendance linéaire (avec une pente d'environ -0,007 à Boundiali, -0,031 à Korhogo et -0,041 à Ferkessedougou) indique une régression des nombres de jour de pluie sur l'ensemble des stations. La régression du CWD à la station de Boundiali est moins prononcée avec une diminution des jours consécutifs de pluie de 0,007 jour/ans soit 0,217 jour en 31 ans. A la station de Korhogo et Ferkessedougou le CWD régresse respectivement de 0,031

jour/an soit environ 1 jour en 31 ans et 0,041 jour/an soit environ 2 jours en 31 ans. Les valeurs du CWD les plus faibles enregistrées récemment sont de 3 jours en 2004 à Boundiali, de 4 jours en 2016 à Korhogo et de 3 jours en 2015 à Ferkessédougou.

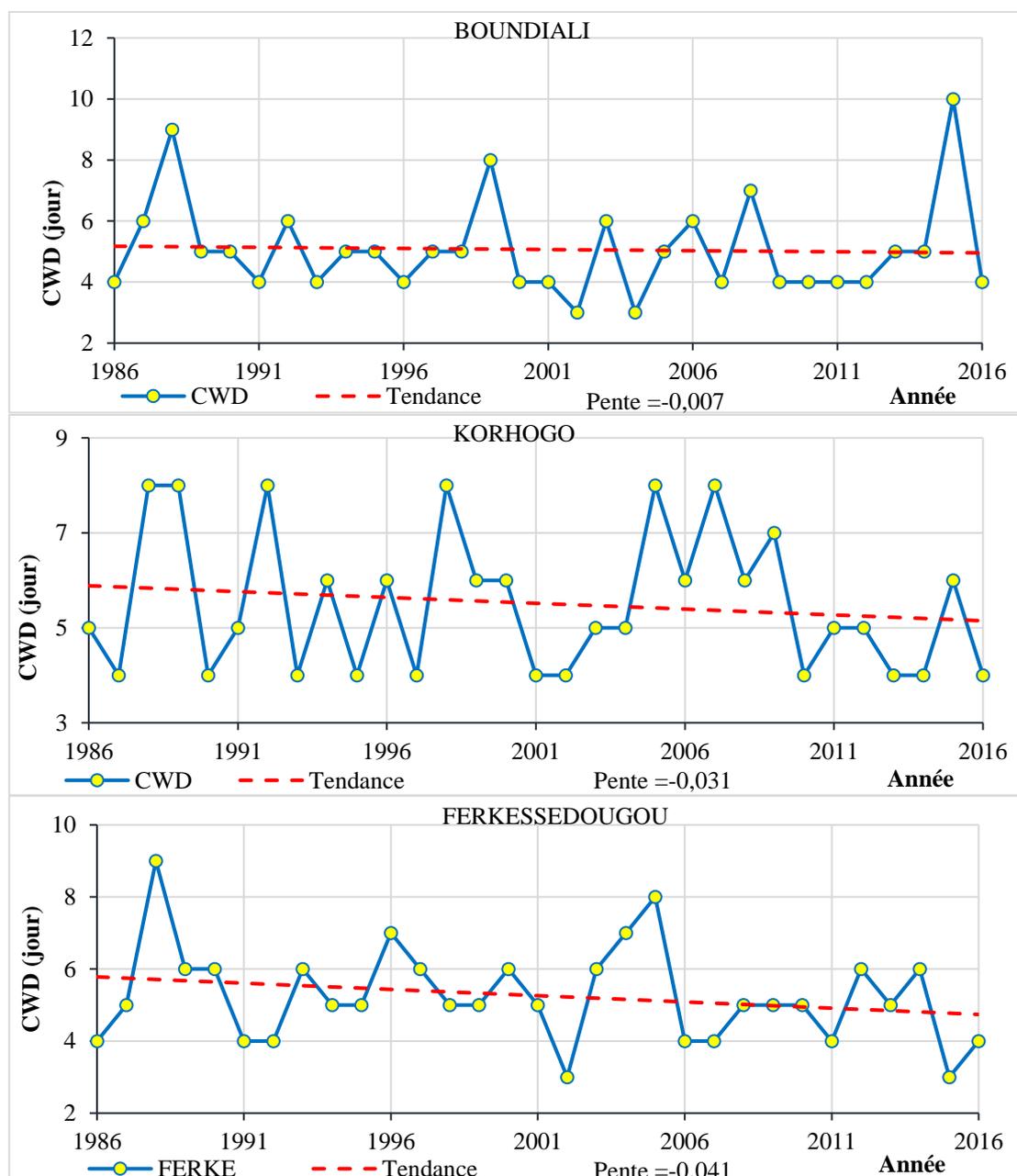


Figure 29 : Évolution interannuelle des jours consécutifs humides

5.2.1.3. Évolution des jours consécutifs secs

L'évolution du nombre maximal de jours consécutivement secs CDD (avec précipitations journalières < 1 mm) dans le BVHBKB est présenté à la figure 30. Cette figure montre qu'à Boundiali, le CDD augmente de 0,174 jour/an, c'est à dire une hausse de 1,74 jours chaque décennie et de 5,4 jours en 31 ans et à Ferkessédougou il augmente de 0,298 jour/an c'est à dire une hausse de 2,98 jours chaque décennie et de 9,2 jours en 31 ans. A la station de Korhogo, on

assiste à une baisse de l'indice CDD de 0,405 jour/an soit 4,05 jours par décennie et environ 12,5 jours en 31 ans. C'est pendant les années 2007 (à Boundiali et Ferkessédougou) et 1998 (à Korhogo) qu'il y a eu de longues séquences sèches respectivement avec 159, 136 et 148 jours consécutifs sans pluie.

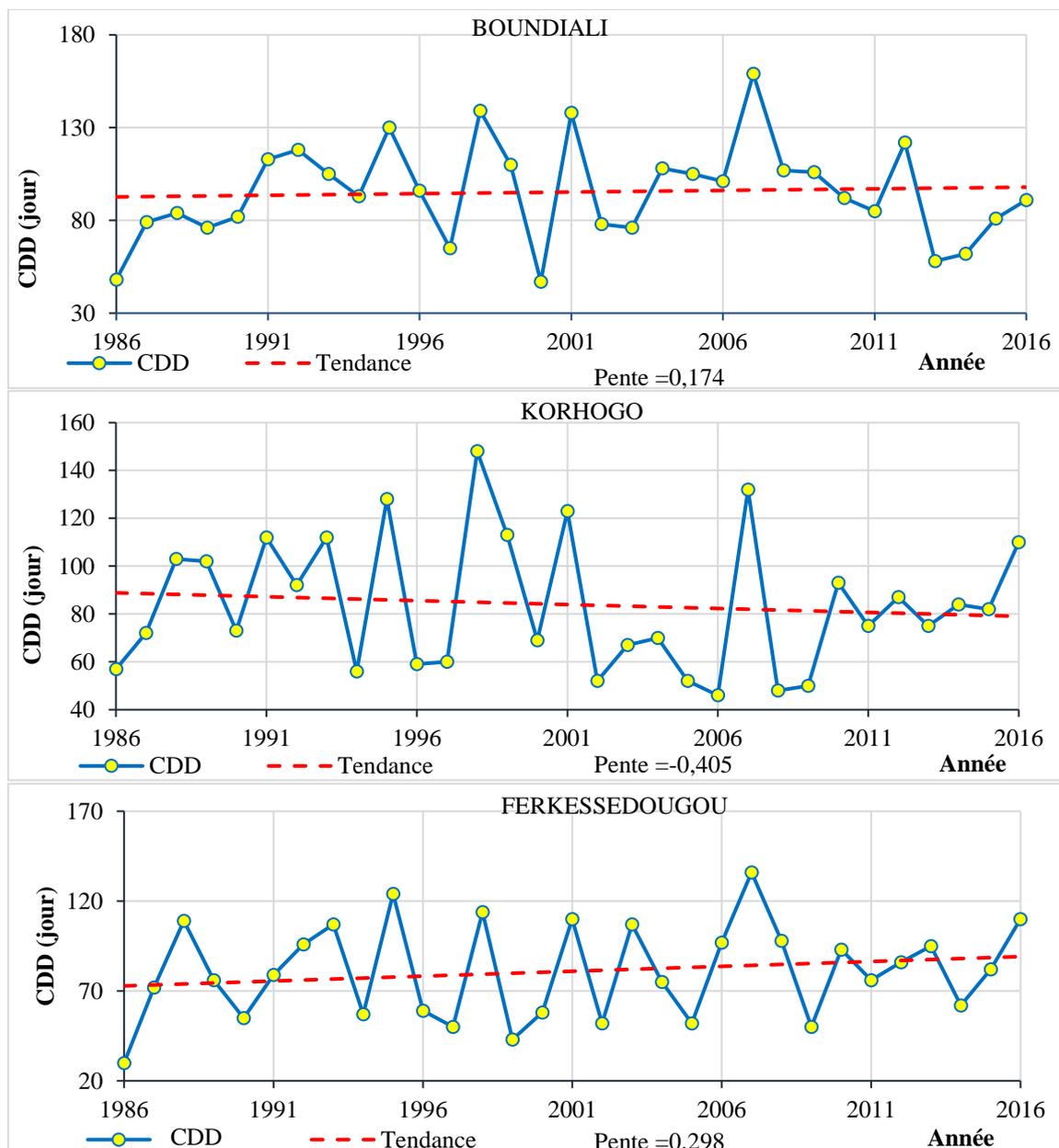


Figure 30 : Évolution interannuelle des jours consécutifs secs

5.2.1.4. Évolution du maximum d'une journée de pluies

La fluctuation interannuelle des précipitations maximales d'un jour pluvieux (RX1) est présentée à la figure 31. Les droites de tendance (avec une pente de -1,147 à Boundiali, -0,07 à Korhogo et -0,175 à Ferkessédougou) montrent une régression de l'amplitude maximale des précipitations d'une journée de pluie dans le BVHBKB. L'indice RX1 baisse de 1,147 mm/an

soit 11,47 mm/décennie ce qui est équivalent à 35,6 mm en 31 ans à la station de Boundiali. À la station de Korhogo il est quasi stationnaire avec une faible augmentation de 0,003 mm/an soit 0,03 mm/décennie. Ce qui est équivalent à moins de 1 mm en 31 ans. À la station de Ferkessedougou le RX1 baisse de 0,175 mm/an soit 1,75 mm/décennie qui est équivalent à 5,43 mm en 31 ans.

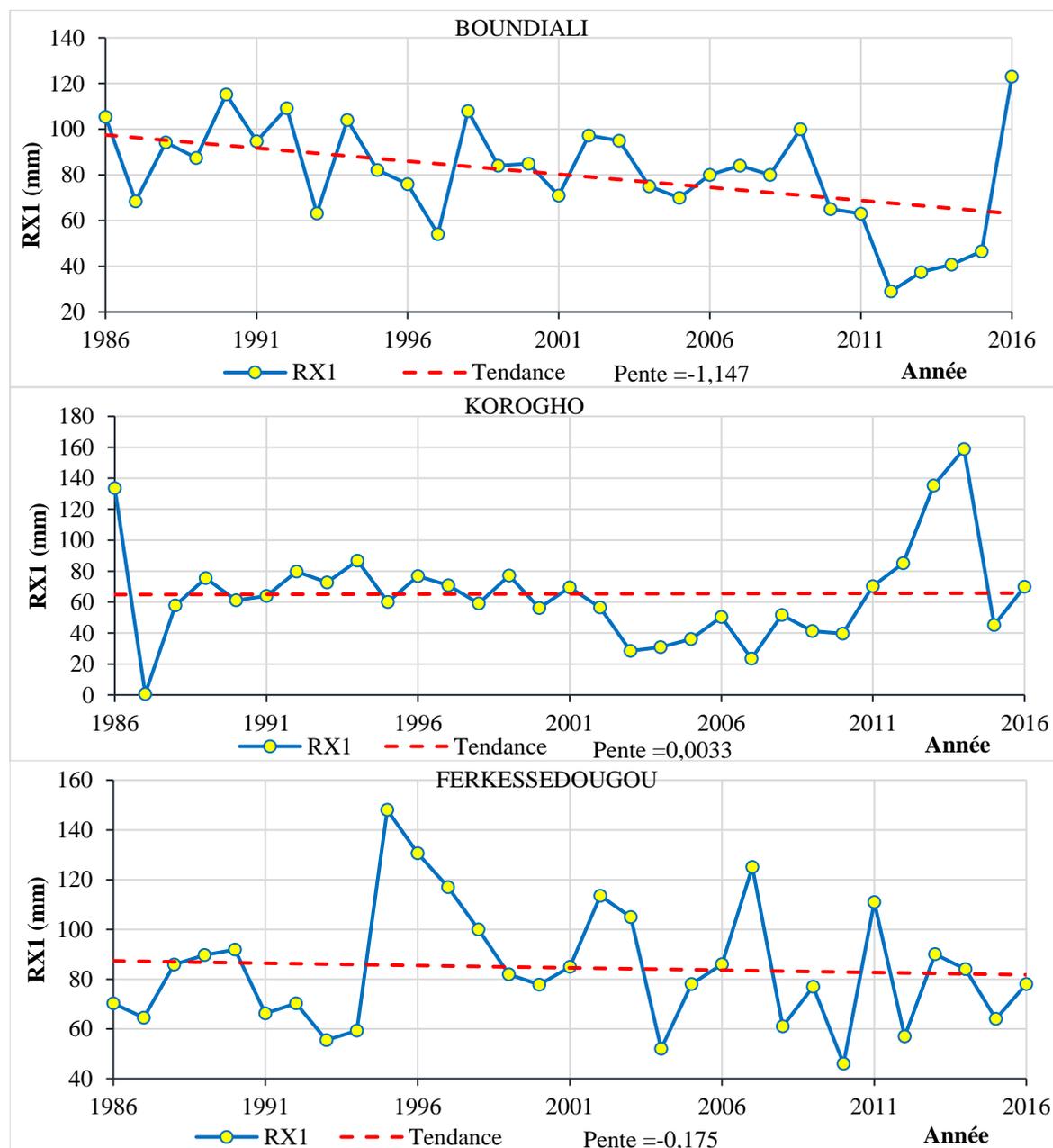


Figure 31 : Évolution du maximum d’une journée de pluies

5.2.1.5. Évolution du cumul maximal des précipitations de 5 jours

La précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs (RX5) pendant l’année est présentée à la figure 32. Les droites de tendance avec une pente de -1,677 à Boundiali, de -0,49

à Korhogo et de -0,191 à Ferkessédougou, montre une régression des hauteurs de pluie sur 5 jours consécutif sur la période 1986 à 2016. On constate donc qu'à la station de Boundiali le RX5 régresse de 1,677 mm/an soit 16,77 mm par décennie c'est-à-dire 51,987 mm en 31 ans. A la station de Korhogo, le RX5 baisse de 0,49 mm/an soit 4,9 mm par décennie ce qui correspond à 15,19 mm en 31 ans. A la station de Ferkessédougou l'indice RX5 baisse de 0,191 mm/an soit 1,91 mm par décennie ce qui est équivalent à 5,921 mm en 31 ans. Les valeurs du RX5 les plus élevées sont observées en 1990 avec 203,1 mm à Boundiali, en 2014 avec 262,8 mm à Korhogo et en 2007 avec 235,6 mm à Ferkessédougou.

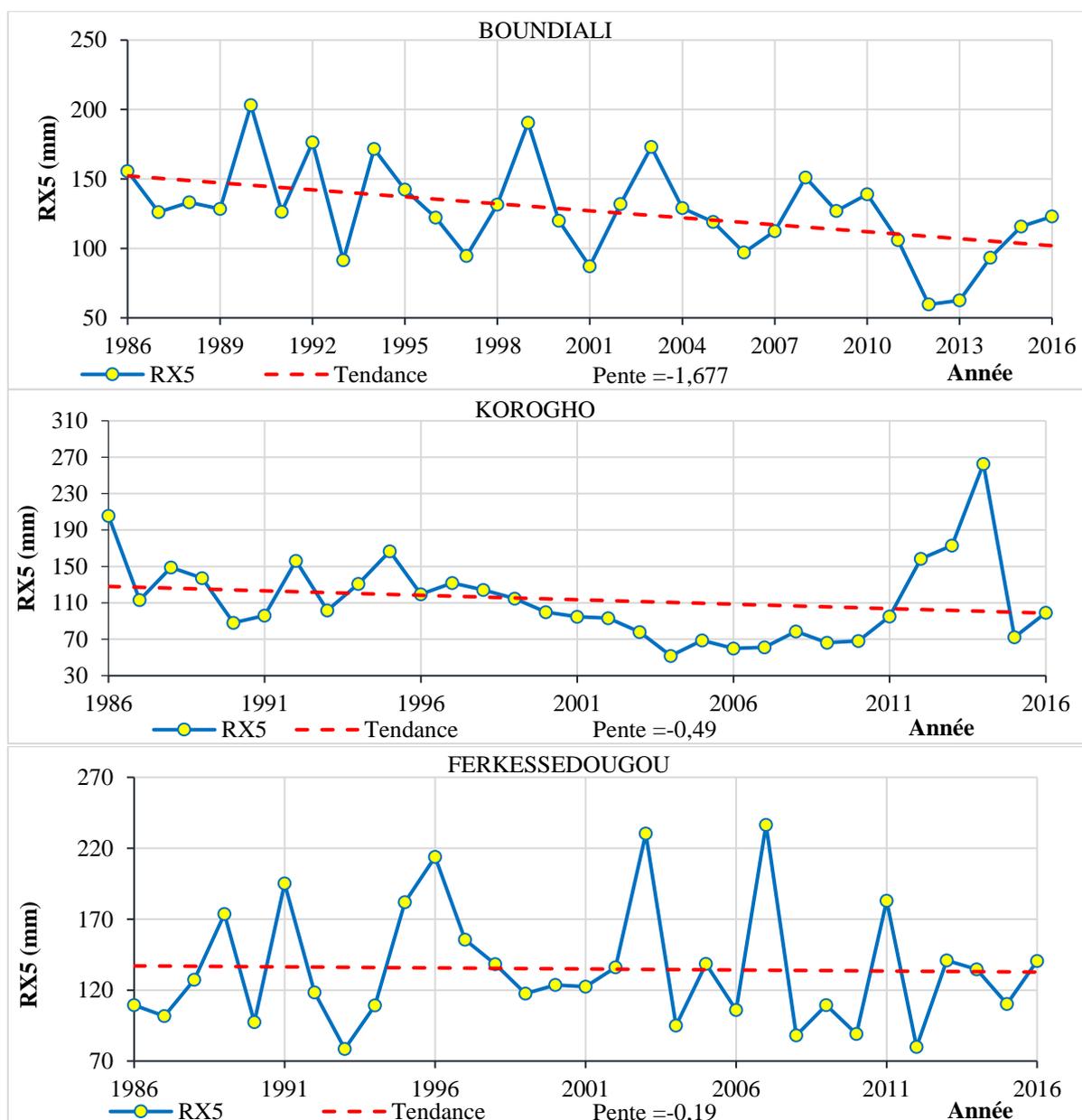


Figure 32 : Évolution du cumul maximal des précipitations de 5 jours

5.2.1.6. Évolution du nombre de jours très humides

La figure 33 montre l'évolution temporelle des jours très humides (R20) correspondant au nombre de jours annuels où la précipitation est supérieure à 20 mm. L'analyse de la figure montre que pour les stations de Boundiali et Korhogo, selon la pente de la courbe de tendance (-0,545 et -0,353 respectivement), R20 régresse chaque décennie d'environ 6 jours dans la zone de Boundiali et 4 jours au niveau de Korhogo. Soit environ 17 jours et 11 jours respectivement à Boundiali et Korhogo. Cependant, à la station de Ferkessédougou, le R20 est en augmentation avec 1 jour de plus par décennie, soit 3 jours en moyenne sur la période 1986-2016.

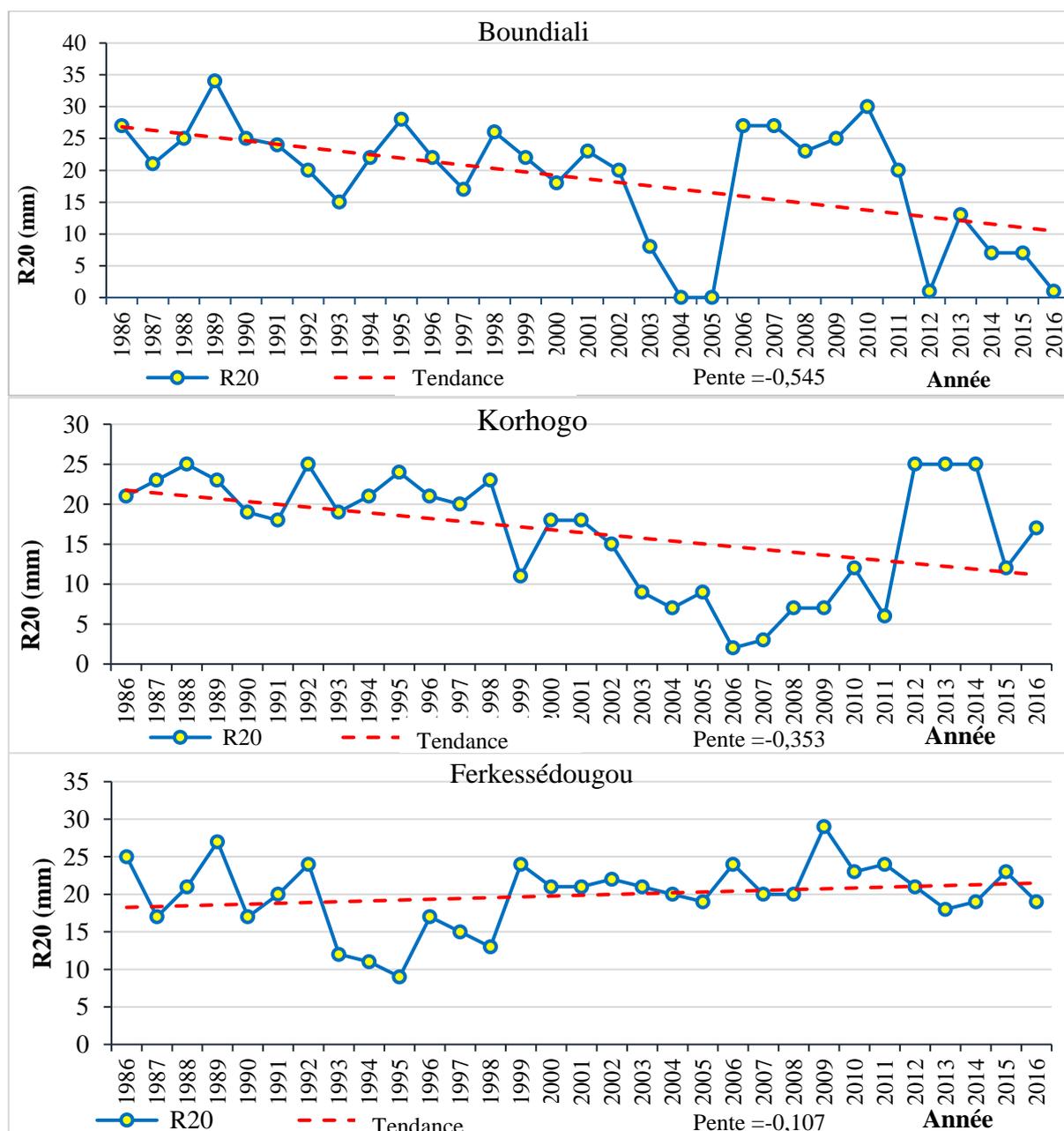


Figure 33 : Évolution interannuelle du nombre de jours très humides

5.2.1.7. Évolution du cumul annuel des précipitations des jours très humides

La figure 34 montre l'évolution de l'indice R95P pendant la période 1986-2016. La tendance de cet indice est à la baisse de 11,529 mm/an, soit 115,29 mm en 10 ans et de 357,399 mm en 31 ans. A la station de Korhogo l'indice R95P baisse de 3,715 mm/an, soit 37,15 mm en 10 ans et de 115 mm en 31 ans. Quant à la station de Ferkessedougou l'indice R95P est à la hausse de 2,59 mm/an, soit 25,9 mm en 10 et de 80,29 mm en 31 ans.

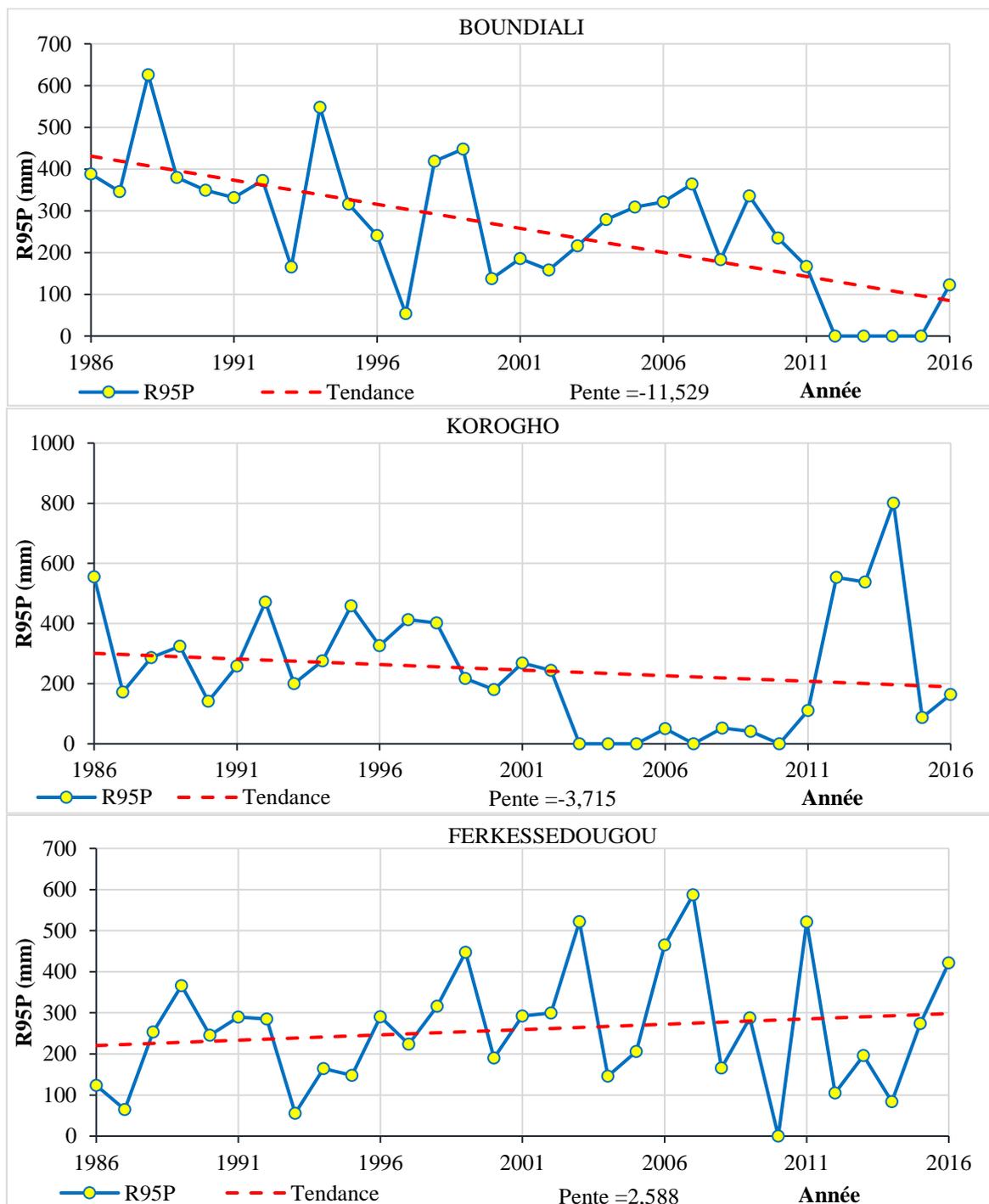


Figure 34 : Évolution interannuelle des jours très humides

5.2.2. Tendances des indices de température sur la période 1986-2016

5.2.2.1. Température maximale et minimale annuelle

L'analyse de la figure 35 montre une tendance des températures maximales et minimales dans l'année (respectivement TXx et TNn) sur la période 1986-2016. Sur cette figure les indices TXx et TNn évoluent inversement sur le BVHBKB. Les droites de tendance de TXx et TNn (de pente 0,006 pour TXx et -0,133 pour TNn) indiquent une augmentation du TXx non prononcée avec 0,006 °C/an, soit environ 0,2 °C en 31 ans. Par contre, le TNn régresse de 0,133 °C soit environ 4 °C en 31 ans. C'est en 2016 que la TXx a atteint sa plus grande valeur (41,8°C) ces 31 dernières années tandis que c'est en 2010 et 2011 que la TNn a atteint sa plus faible valeur (10 °C) dans le BVHBKB.

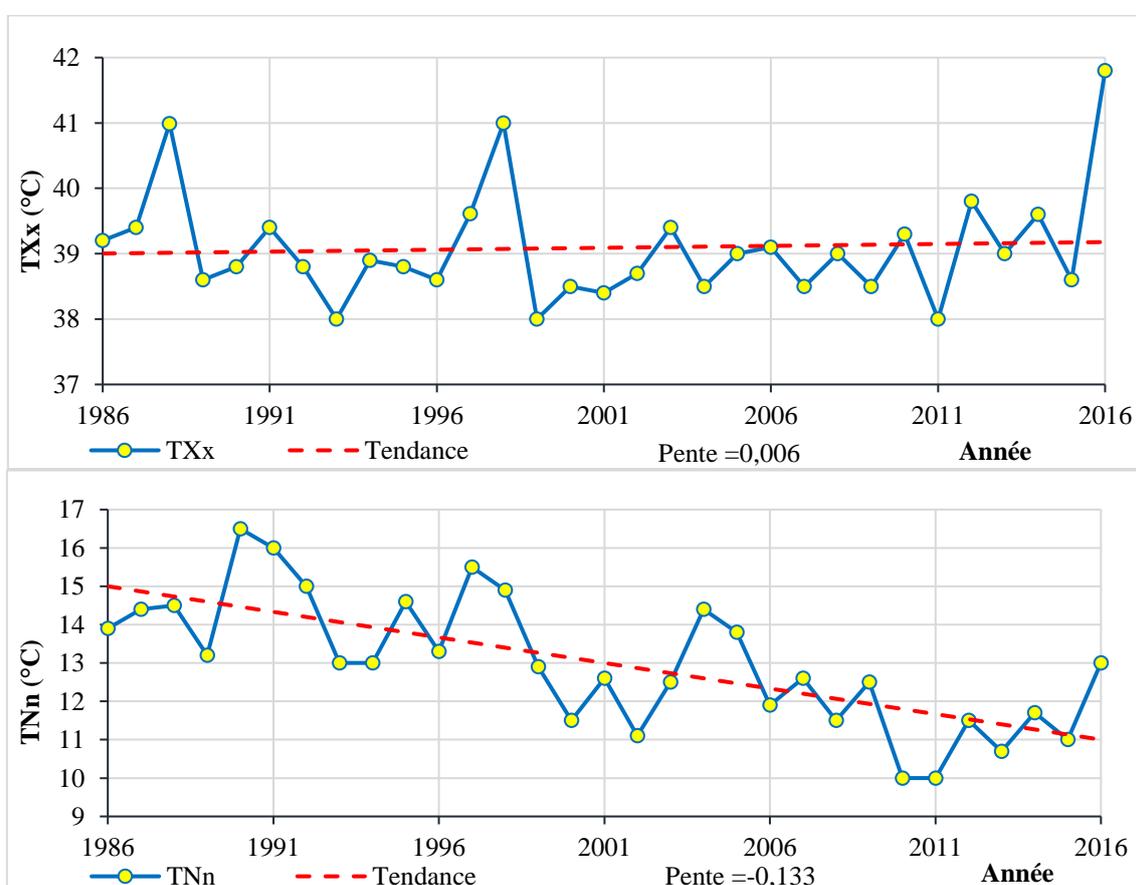


Figure 35 : Évolution des températures maximales et minimales annuelles
Température maximale annuelle (TXx), Température minimale annuelle (TNx)

5.2.2.2. Évolution interannuelle des jours froids et chauds

La figure 36 présente l'évolution interannuelle du nombre de jours froids (WSDI) et chauds (CSDI) sur la période 1986-2016 dans le BVHBKB.

Les tendances de l'évolution du nombre de jours froids et de jours chauds évoluent dans le même sens. Le nombre de jours froids et chauds dans l'année est à la hausse sur la période

1986-2016 dans le BVHBKB. Cette hausse est de 0,389 jour/an, soit 3,89 jours par décennie, c'est-à-dire 12 jours en 31 ans pour les séquences froides et de 0,168 jour/an soit 1,68 jours par décennie, ce qui équivaut à environ 5 jours en 31 ans pour les jours chauds. Le nombre maximum de jours froid et chaud atteint sur la période d'étude est de 56 jours en 2016 pour les séquences froides et de 19 jours en 2015 pour les séquences chauds.

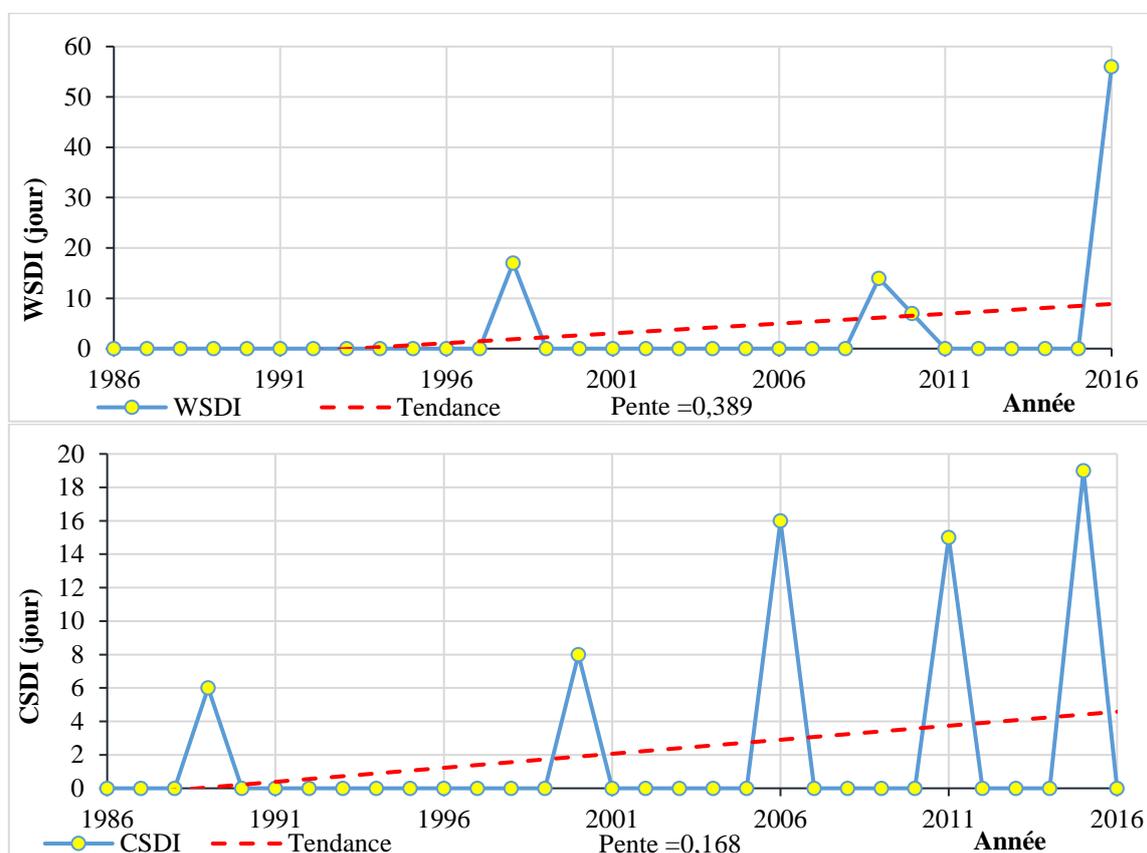


Figure 36 : Évolution interannuelle du nombre de jours froids et chauds

5.2.2.3. Pourcentage des nuits extrêmement froides et jours extrêmement chauds

La figure 37 montre l'évolution du pourcentage des nuits froides (TN90P) et celle des jours chauds (TX90P). Selon cette figure, le pourcentage de jours froids et chauds dans l'année est à la hausse sur la période 1986-2016 dans le BVHBKB. Cette hausse est de 0,314 %/an soit 3,14% par décennie ; ce qui équivaut à une hausse 9,734% en 31 ans pour les séquences froides et de 0,551%/an, soit 5,51% par décennie, correspondant à 17,081% en 31 ans. L'année 2016 a connu un grand nombre (environ 19 jours) de nuits les plus froides et des jours les plus chauds sur la période 1986 à 2016.

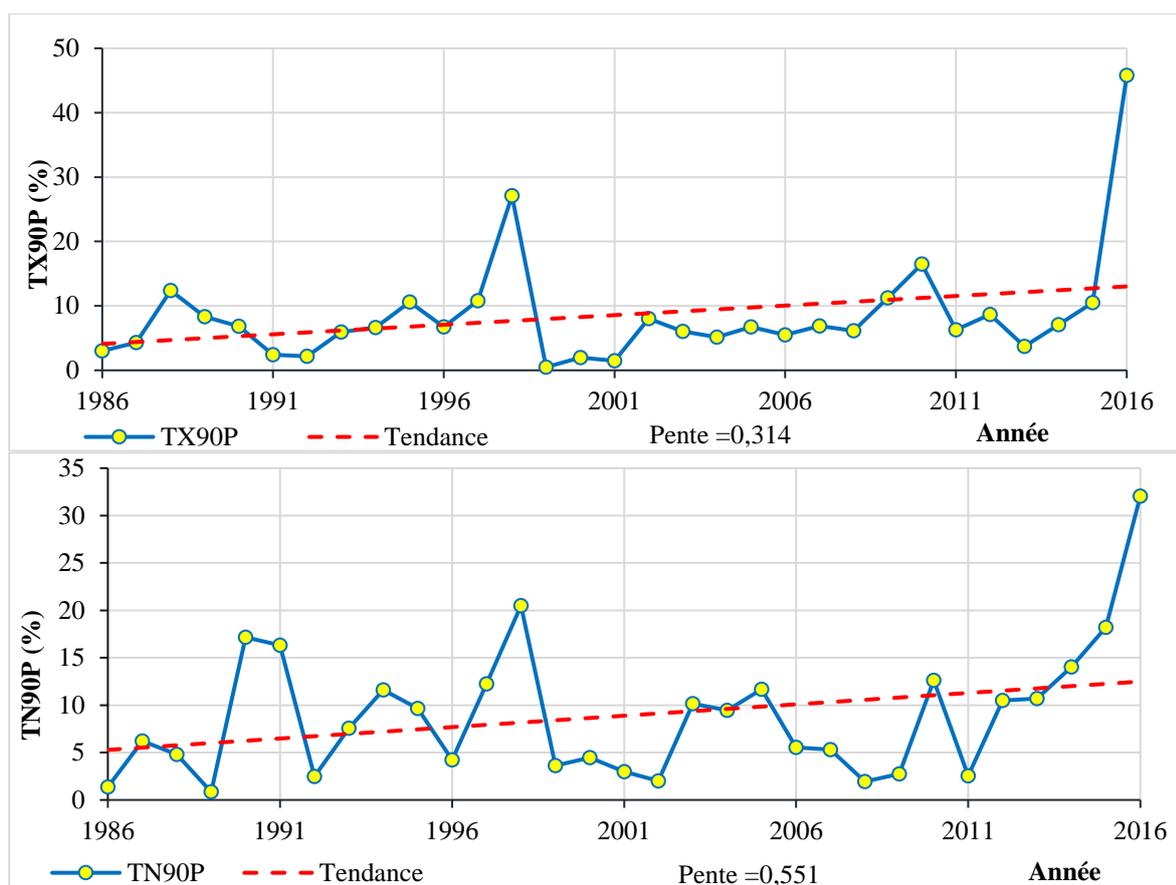


Figure 37 : Le pourcentage de nuits chaudes et de jours chauds

5.2.2.4. Tendence des amplitudes thermiques diurne

La figure 38 montre l'évolution des amplitudes thermiques diurnes. Cette évolution se traduit par une tendance à la hausse des amplitudes thermiques diurnes. Le BVHBKB enregistre une hausse de $0,0181\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{an}$, soit $0,181\text{ }^{\circ}\text{C}$ par décennie ; ce qui est équivalent à environ $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 31 ans. De fortes variations entre les températures minimales et maximales sont observées dans les années 2018 (avec une hausse de $12,69\text{ }^{\circ}\text{C}$) et 2016 (avec une hausse de $12,94\text{ }^{\circ}\text{C}$).

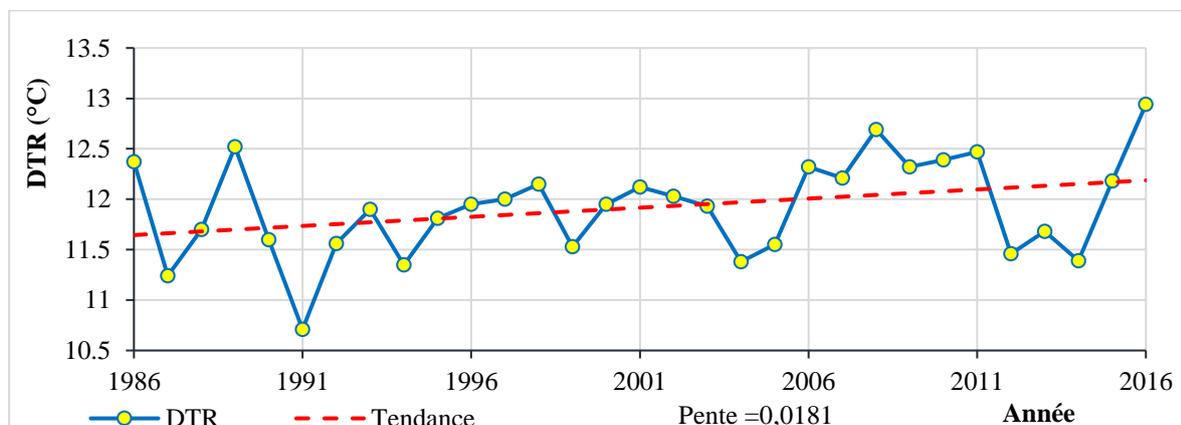


Figure 38 : Tendence des amplitudes thermiques

5.2.3. Étude statistique de la corrélation entre les conditions climatiques extrêmes et le rendement de la canne à sucre pluviale

5.2.3.1. Analyse en Composantes Principales

Les groupes de variables suivants G1, G2, et G3 sont utilisés pour l'analyse en composante. Le premier groupe (G1) est composé des rendements de la production pluviale de la canne à sucre (R.T.Ha.) et les indices de précipitations extrêmes (PRCPTOT, CDD, CWD, RX1, RX5, RX20 et R95P) de la station de Ferkessédougou ; le second groupe (G2) est composé des R.T.Ha. et les indices de températures extrêmes (TXX, TNn, TX90P, TN90P, WSDI, CSDI et DTR) de ladite station et le troisième groupe (G3) est formé à partir des rendements de la production pluviale de la canne à sucre et de tous les indices climatiques corrélés avec celui-ci. Cette analyse permet d'abord de mettre en évidence la corrélation entre les rendements et les indices de précipitations extrêmes, puis d'examiner la relation avec les indices de températures extrêmes à la station de Ferkessédougou.

▪ Choix du nombre d'axes

Le tableau XVI montre les valeurs propres ainsi que le pourcentage de la variance expliquée par chaque axe factoriel des différents groupes de variables. Ces axes ou dimensions (de Dim 1 à Dim 5) représentent l'intégralité (100 %) de l'information analysée. La première dimension explique 45,4 % des variables du groupe G1, 42,4 % des variables du groupe G2 et 49,9 % des variables du groupe G3. En revanche, la deuxième dimension explique 26,7 % des variables de G1, 21,1 % des variables de G2 et 26,7 % des variables de G3. Cependant, l'analyse s'est faite sur les deux premières dimensions. En effet, les valeurs propres des différents groupes de variables obtenues respectent le critère de Kaisier ($VP > 1$). Ainsi, le couple dim 1 et dim 2 traduit à lui seul l'essentiel de l'inertie du jeu de données.

Tableau XVI : Valeurs propres et variances des différents axes G1, G2 et G3.

Groupe	Dim 1		Dim 2		Dim 3		Dim 4		Dim 5		VC%
	VP	PoV %	VP	PoV %	VP*	PoV %	VP	PoV %	VP	PoV %	
G1	4,1	45,4	2,4	26,7	1,1	12,2	0,8	9,3	0,4	3,9	72,1
G2	3,4	42,4	1,7	21,1	1,0	14,0	0,8	10,3	0,4	5,1	63,0
G3	2	49,9	1,1	26,7	0,8	20,6	0,1	2,8	-	-	76,6

VP : Valeur Propre, **PoV (%) :** Pourcentage de variance, **VC (%) :** Pourcentage cumulé de la variance des axes retenus. **G1 :** Rend, PRCPTOT, RX1day, RX5day, R95p, CDD, CWD, et R20 mm ; **G2 :** Rend, TXX, TN90P, TX90P, TNn, WSDI, CSDI et DTR ; **G3 :** Rend, DTR, CDD et R 20 mm ; **Dim :** Dimension.

- Groupe de variables G1

La figure 39 montre le cercle de corrélation du groupe de variables G1. L'analyse révèle que les deux premières composantes principales (Dim1 et Dim2) expliquent environ 72,05 % de la variance totale des données. En projetant les variables sur ces composantes, on constate que la dimension 2 est caractérisée par les variables "production pluviale de la canne à sucre (R.T.Ha.)", l'indice CDD et l'indice R20 mm, ce qui suggère une corrélation entre ces variables. Cependant, la disposition opposée des variables R.T.Ha et R20 mm par rapport à l'axe indique une évolution inverse entre ces deux variables. Les autres indices de précipitation se retrouvent principalement sur l'axe 1. Ainsi, les indices pluviométriques CDD et R20 mm ont une influence sur le R.T.Ha.

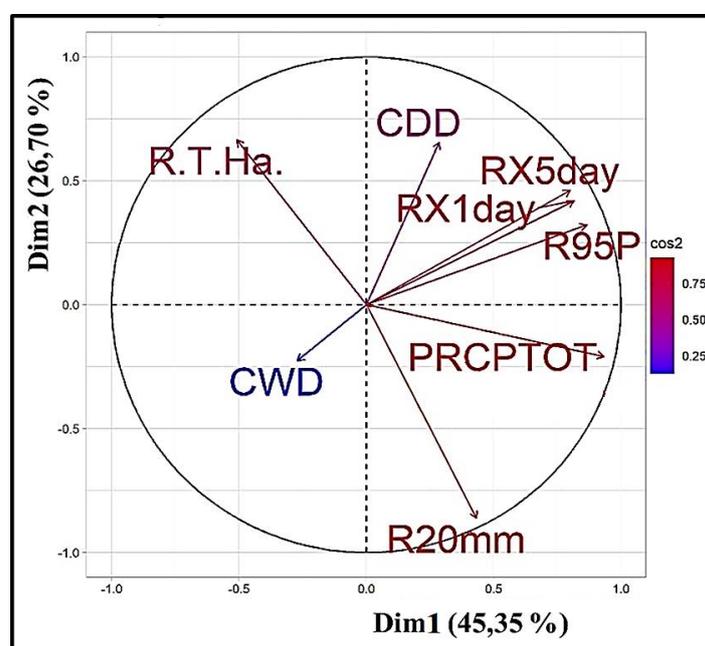


Figure 39 : Cercle de corrélation du groupe de variables G1

- Groupe de variables G2

Le cercle de corrélation présenté à la figure 40 montre que l'axe 2 (Dim 2) est dominé par les variables rendements et l'indice DTR et évoluent en sens inverse tandis que les autres variables telles que : les indices TXx, TNn, TN90P, TX90P, CSDI et WSDI représentent l'axe 1. Ainsi, de cette analyse il ressort que les indices de températures extrêmes, excepté l'indice DTR n'ont aucun effet direct sur le rendement (R.T.Ha.).

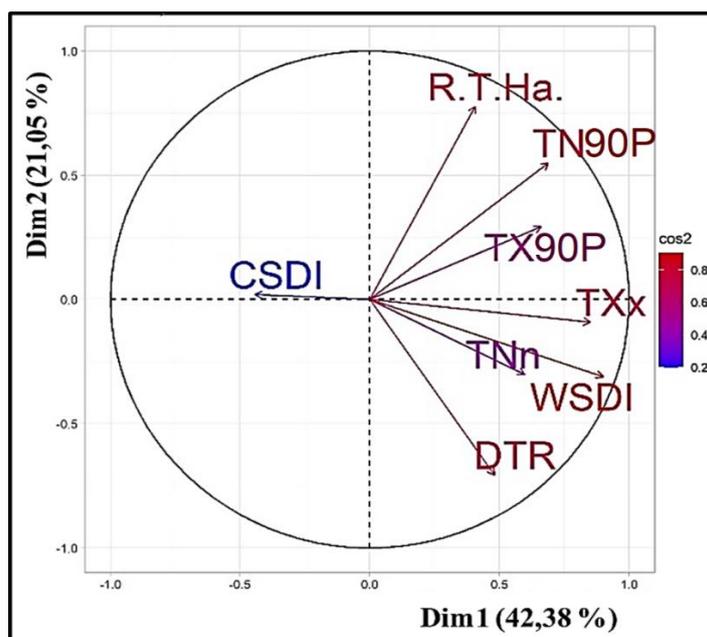


Figure 40 : Cercles de corrélation du groupe de variables G2

- Groupe de variables G3

Les composantes principales (Dim 1) et (Dim 2) expriment 76,50 % de l'information totale. On note que l'axe 1 est représenté par les variables rendement et R20 mm. Cependant, leur position dans les deux plans opposés de l'axe 1 montre que l'un agit sur l'autre négativement dans leur évolution. Quant à l'axe 2, il est composé des indices CDD et DTR (Figure 41). En somme, l'analyse en composante principale du G3 montre que les extrêmes de températures ont une faible influence sur le R.T.Ha.

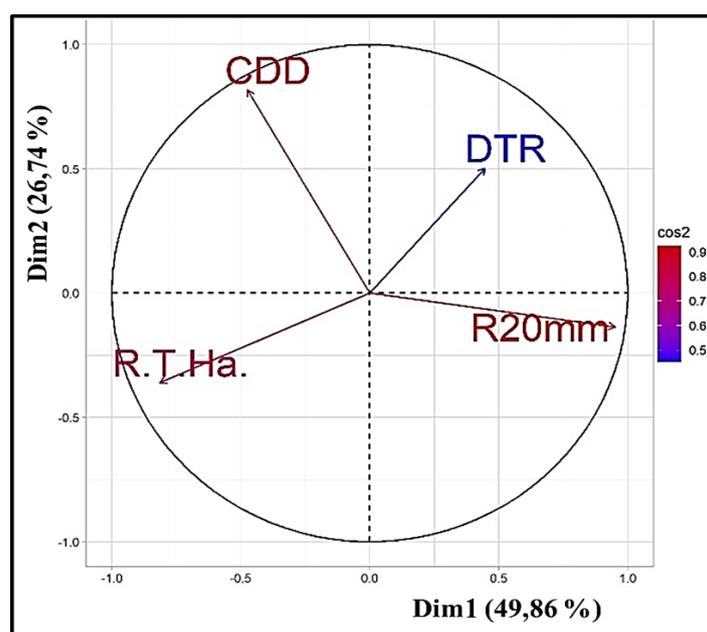


Figure 41 : Cercle de corrélation du groupe de variables G3

5.2.3.2. Modèles de régression linéaires multiples

A l'issue de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) des 3 groupes de variables (G1, G2 et G3), les indices qui en sont sortis corrélés avec le rendement ont servi à réaliser le modèle de régression linéaire afin de confirmer leur impact sur le rendement de la canne à sucre (Tableau XVII). Les divers modèles linéaires représentés par les équations dans le tableau XVII mettent en évidence les relations statistiques entre le rendement et les indices climatiques. Les résultats des équations 3, 4, 5 et 6 montrent une qualité satisfaisante et significative de la régression avec des valeurs de p-Value inférieures à 0,05. L'analyse de ces équations de régression souligne les points suivants :

- L'indice du nombre de jours avec précipitation ≥ 20 mm (R20) est corrélé négativement et significativement ($r = 0,71$; $p\text{-value} = 0,0039$) avec le rendement.
- Les résultats sont beaucoup améliorés lorsque nous passons aux modèles linéaires à trois variables. De ce fait, les équation 4 et équation 5 expliquent respectivement près de 67 % ($r = 0,82$; $p\text{-value} = 0,0016$) et près de 46 % ($r = 0,69$; $p\text{-value} = 0,01$) de la variance du rendement.
- L'équation 6 exprime 63 % ($r = 0,79$; $p\text{-value} = 0,0069$) de la variance du rendement. Cela implique montrant que l'évolution des indices DTR et CDD impact significativement le rendement.

Tableau XVII : Corrélations entre le rendement de la canne à sucre pluviale et les indices climatiques extrêmes par la méthode de régression linéaire multiple

	Equation linéaires	R²	p-Value
1	Rend = -0,0012*CDD+46,35	0,09	0,98
2	Rend = 2,51*DTR+77,23	0,026	0,42
3	Rend = -1,39*R20mm+77,104	0,5	0,0039
4	Rend = -1,84*R20mm-0,12*CDD+97,69	0,67	0,0016
5	Rend = -1,36*R20mm-0,64*DTR+84,42	0,46	0,01
6	Rend = -2,51*DTR-0,0026*CDD+77,48	0,63	0,0069
7	Rend = -1,83*R20mm-0,11*DTR-0,12*CDD+98,93	0,129	0,74

5.3. Étude du changement climatique dans le bassin versant du Haut Bandama sur la période 2021-2050

5.3.1. Choix des modèles climatiques régionaux

La comparaison statistique de la distribution intra-saisonnière des précipitations simulées des modèles climatiques régionaux CCLM4, RCA4, MIROC, MOHC, MPI, IPSL, NOAA, NCC, RACMO 22T et CanESM2 aux précipitations observées montre une très grande variabilité. Néanmoins, les modèles climatiques CCLM4, RCA4 et CanESM2 ont montré une corrélation

(R) de plus de 0,95 entre les précipitations journalières simulées et celles observées avec des écarts types de moins de 1,2. Ces trois modèles présentent une erreur absolue de simulation de moins de 0,5 par rapport aux précipitations observées (Figure 42) contrairement aux autres modèles. Ainsi, pour la simulation climatique sur la période 2021-2050, trois modèles climatiques régionaux ont été retenus, à savoir : RCA4, CanESM2 et CCLM4 selon deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols (RCP4.5 et RCP8.5). Tous ces modèles sont à un pas de temps journalier, de résolution spatiale 0,44 (environ 50 kmx50 km) mis à l'échelle dynamique à partir de trois MCG respectivement CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, ICHEC-EC-EARTH, MPI-M-MPI-ESM-LR.

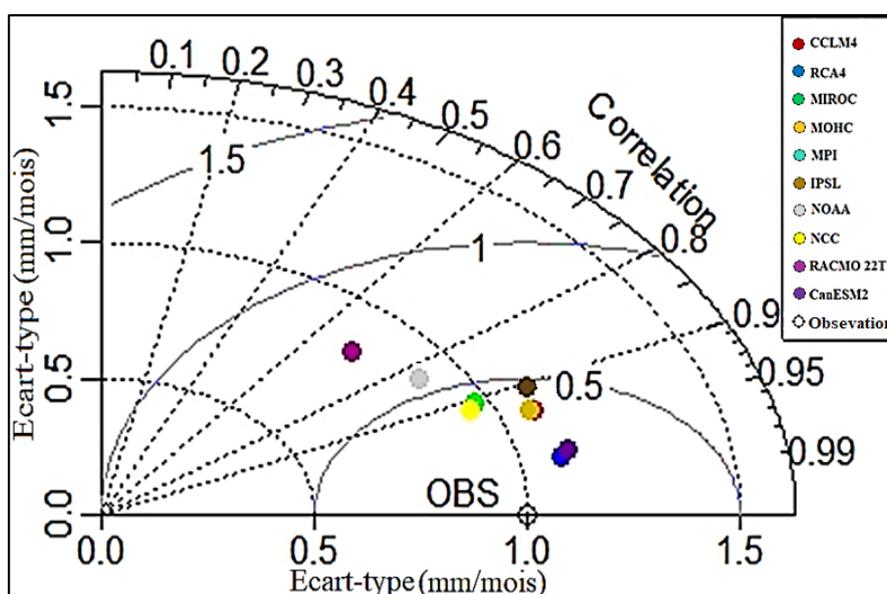


Figure 42 : Diagramme de Taylor des précipitations moyennes simulées par 10 modèles climatiques régionaux comparées aux précipitations moyennes observées

5.3.2. Mise en évidence des biais des précipitations brutes simulées

5.3.2.1. Variation entre les précipitations moyennes mensuelles brutes simulées et observées

La figure 43 présente la variation saisonnière des précipitations observées et simulées par les modèles sur la période de référence. Il en ressort que les différents modèles (RCA4, CanESM2 et CCLM4) respectent la saisonnalité des pluies avec cependant des écarts au niveau des pics. Le modèle CanESM2 représente mieux les variations saisonnières des précipitations observées par rapport aux modèles RCA4 et CCLM4 sur la période de référence (1976-2005). Cependant, ce modèle surestime les pics de précipitations sur l'ensemble des cinq (5) stations. Quant au modèle CCLM4, il sous-estime les précipitations mensuelles (avec un écart plus prononcé à la station de Tengréla) sauf à la station de Ouangolodougou où il surestime les précipitations

mensuelles. Par contre, le modèle CCLM4 présente un décalage, donc un retard (avril au lieu de mars) dans le démarrage des saisons des pluies.

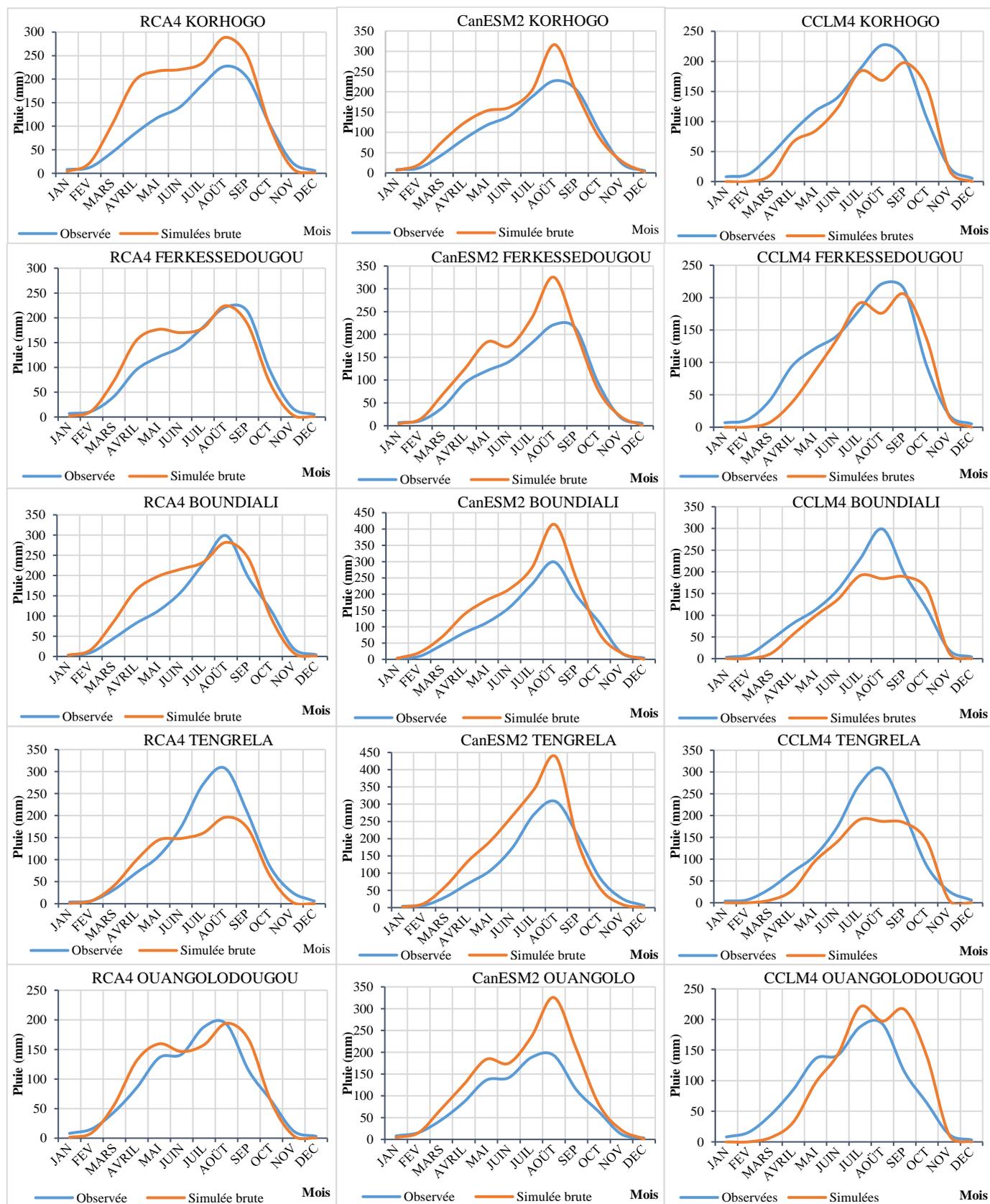


Figure 43 : Comparaison entre les précipitations moyennes mensuelles observées et simulées sur la période 1976-2005

5.3.2.2. Variations et écarts moyens annuels entre les précipitations simulées et observées

La figure 44 présente la comparaison des précipitations brutes annuelles simulées par rapport à celles observées. On note une surestimation de la pluviométrie annuelle par les modèles RCA4 et CanESM2 avec des excédents pluviométriques maximums de 490,5 mm pour le modèle RCA4 à Korhogo et de 440,3 pour le modèle CanESM2 à Ouangolodougou (Figure 44). Tout de même, à la station de Tengréla, le modèle RCA4 sous-estime la pluviométrie annuelle avec un déficit de 253,3 mm. Le modèle CCLM4 quant à lui sous-estime les hauteurs de pluie annuelle observées sur l'ensemble des stations (avec pour écart maximum de 229,4 mm) à l'exception de la station de Ouangolodougou où le modèle surestime légèrement la hauteur de pluie annuelle observée (-58,8 mm). Le modèle CCLM4 présente une variation interannuelle de la pluviométrie plus proche à la variation interannuelle des données observées sur la période de référence par rapport aux modèles RCA4 et CanESM2. Il est également à noter que la variation des pluies annuelles simulées par le modèle CanESM2 est moins homogène que celle des autres modèles climatiques étudiés. L'application du test de Mann-Whitney signé au seuil de significativité de 5 % aux données pluviométriques annuelles des trois modèles climatiques (qui donne $p\text{-value} = 0,0001 \ll 0,05$) montre qu'il existe une différence significative entre les pluies annuelles simulées par les modèles et celles observées allant de 58 à 318 mm (Tableau XVIII).

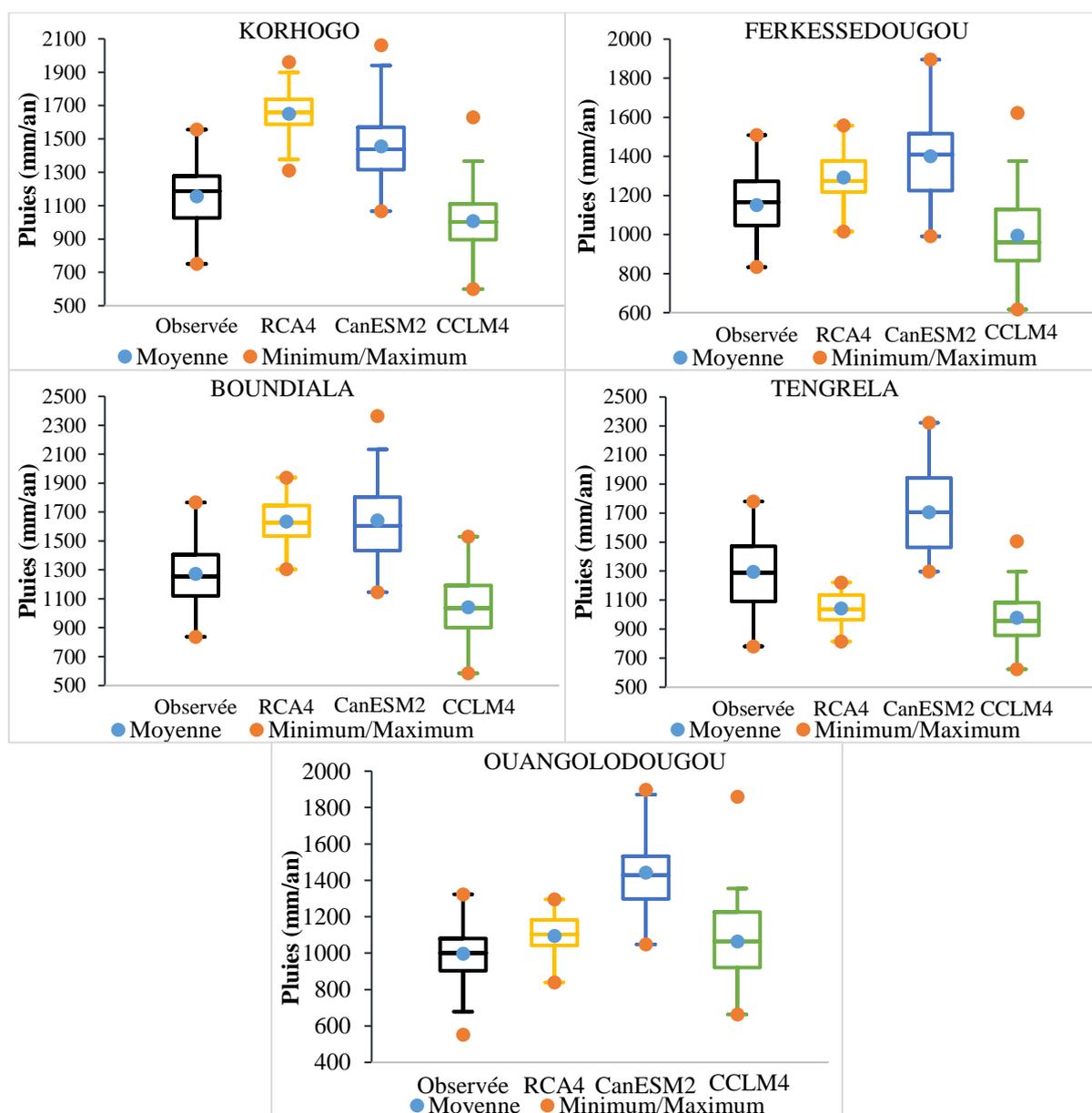


Figure 44 : Comparaison entre les précipitations moyennes annuelles brutes simulées et celles observées sur la période de référence 1976-2005

Tableau XVIII : Ecart relatif entre les hauteurs de pluies annuelles simulées et observées

Station	Ecart relatif			
	Observées (mm)	RCA4	CanESM2	CCLM4
Korhogo	1155,6	490,5	217,3	-148,2
Ferkessedougou	1149,9	103	294,5	-156
Boundiali	1271,4	272,6	398,54	-229,4
Tengréla	1295,8	-258,3	-410,5	-318
Ouangolodougou	1004,2	82,3	440,3	58,8

5.3.2.3. Comparaison du nombre de jours pluvieux simulés et observés

La figure 45 montre que les modèles ne simulent pas correctement le nombre de jour pluvieux dans l'année au niveau de toutes les stations.

Pour les modèles RCA4 et CanESM2, l'analyse des graphiques montres une surestimation significative du nombre de jours pluvieux tandis que le modèle CCLM4 sous-estime significativement le nombre de jours pluvieux ($p\text{-value} = 0,0001 < 0,05$).

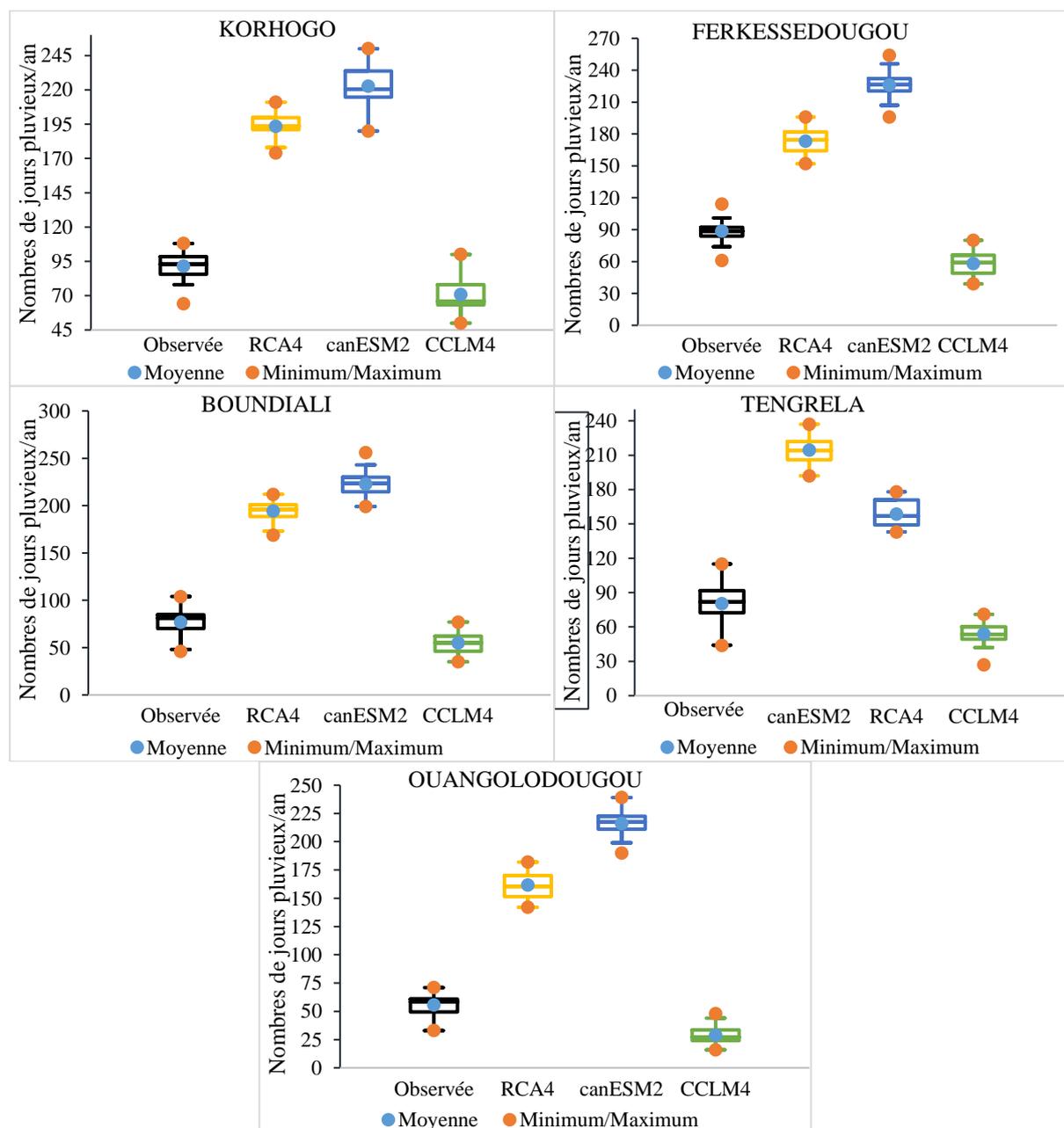


Figure 45 : Comparaison entre le nombre de jours pluvieux simulées brutes et le nombre de jours pluvieux observés sur la période de référence 1976-2005

5.3.3. Mise en évidence des biais de températures

La figure 46 présente la variation des températures minimales moyennes mensuelles (Tmin) et maximales moyennes mensuelles (Tmax) observées et simulées par les modèles climatiques sur la période de référence 1976-2005. L'allure des différentes courbes est identique avec les maximas qui se présentent au cours des mêmes mois (mars et septembre pour les Tmin et mars et novembre pour les Tmax) et les valeurs minimales également (en août). La saisonnalité est bien respectée au niveau des différents modèles. Cependant, les modèles RCA4 et CanESM2 sous-estiment de façon générale les maximas des Tmin et Tmax de mars et de novembre. Quant au modèle CCLM4, on observe des écarts considérables entre les maximas et les minimas dans les séries de température. Il surestime les maximas des Tmin de février à novembre (avec pour pic 26,50 °C en avril) et les maximas des Tmax de février à mai avec pour pic environ 38,87 °C en mars sur l'ensemble des stations. Ce modèle sous-estime aussi avec le modèle CanESM2 les Tmax de juin à décembre avec 24,89 °C comme la valeur la plus faible en août. Les écarts moyens entre les températures simulées et celles observées sur l'ensemble des stations sont de 1,7 °C, 2,15°C et 0,6 °C respectivement pour le modèle RCA4, CanESM2 et CCLM4.

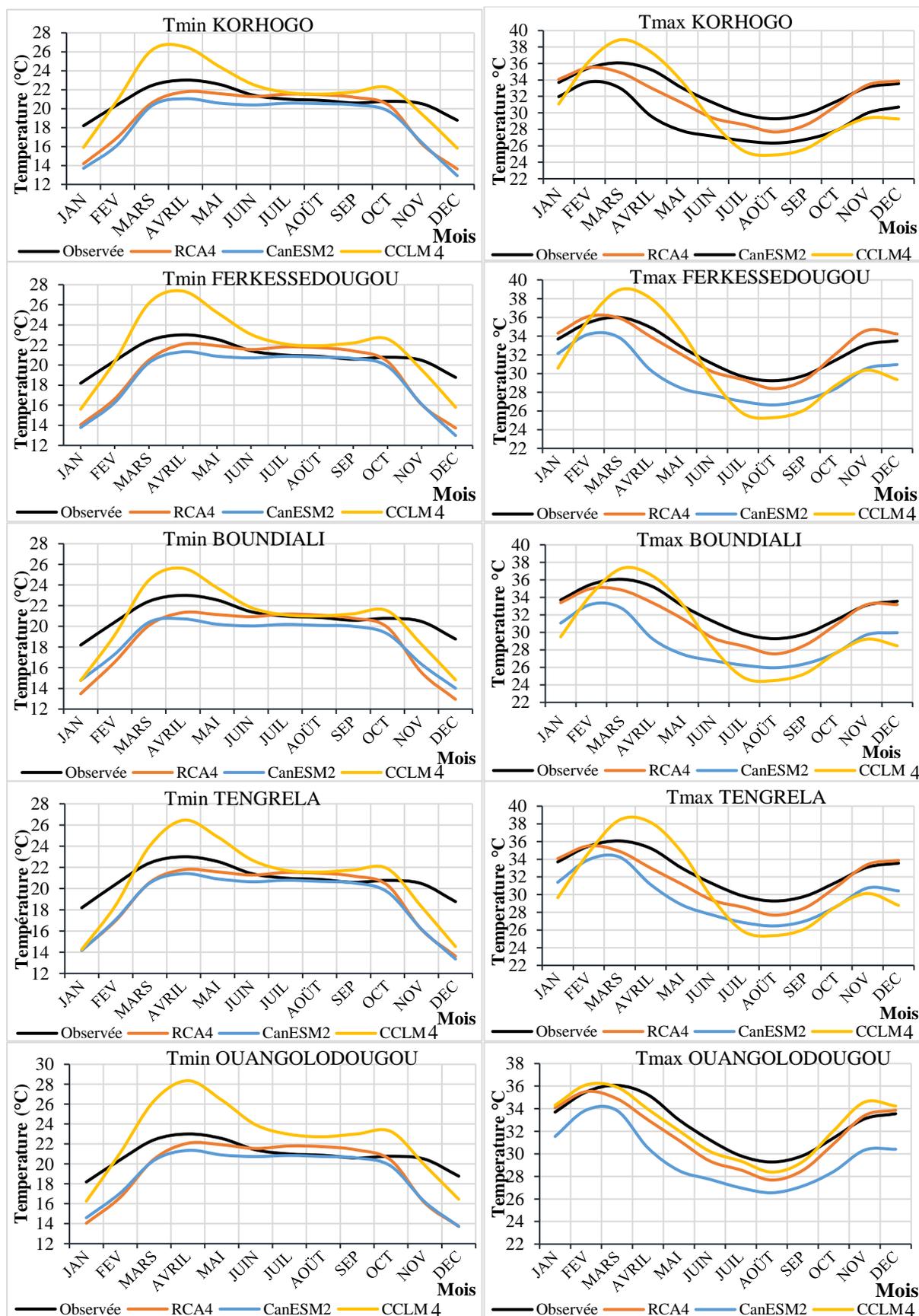


Figure 46 : Comparaison entre les températures minimales et maximales moyennes mensuelles observées et simulées sur la période de référence 1976-2005

5.3.4. Analyse des données climatiques corrigées sur la période de référence

5.3.4.1. Analyse des précipitations et nombre de jour de pluies observées et simulées corrigées sur la période 1976-2005

L'analyse des données simulées corrigées permet d'évaluer la fiabilité des données corrigées et la performance de la méthode de correction choisie à corriger les biais identifiés au niveau de chaque paramètre. La figure 47 présente les précipitations simulées corrigées et les précipitations observées sur la période de référence 1976-2005. L'on observe que la distribution des données de pluie corrigée est pratiquement confondue à celle des observations (Figure 47). On constate tout de même que les modèles surestiment légèrement les pics de précipitations sur l'ensemble du bassin versant sauf au niveau de la station de Ouangolodougo.

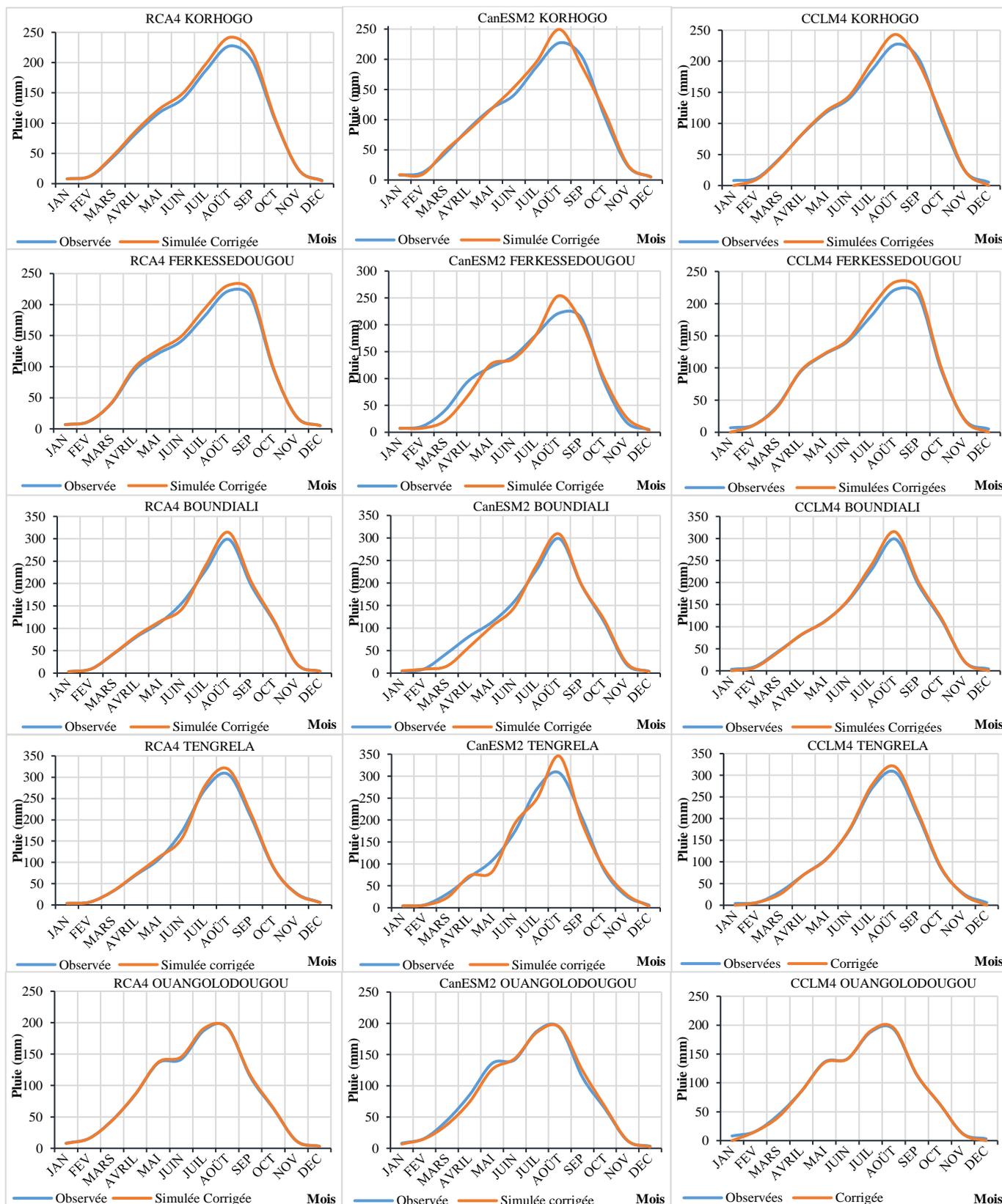


Figure 47 : Comparaison entre les précipitations moyennes mensuelles simulées corrigées et les précipitations observées sur la période de référence 1976-2005

Sur l'ensemble des 5 stations étudiées, les hauteurs de précipitations annuelles et le nombre de jours pluvieux ont été également corrigés. Les cumuls annuels des précipitations et le nombre de jours annuels pluvieux corrigés sont sensiblement similaires à ceux observés sur la période de référence 1976-2005 (Figure 48 et figure 49 respectivement). Les valeurs moyennes annuelles de l'intensité des pluies et du nombre de jours pluvieux sont très proches de celles observées à l'exception du modèle RCA4 à la station de Boundiali qui surestime la pluie (avec un écart de 31 mm) et le modèle CCLM4 qui lui surestime le nombre de jours pluvieux à la station de Korhogo (avec un écart de 7 jour/an).

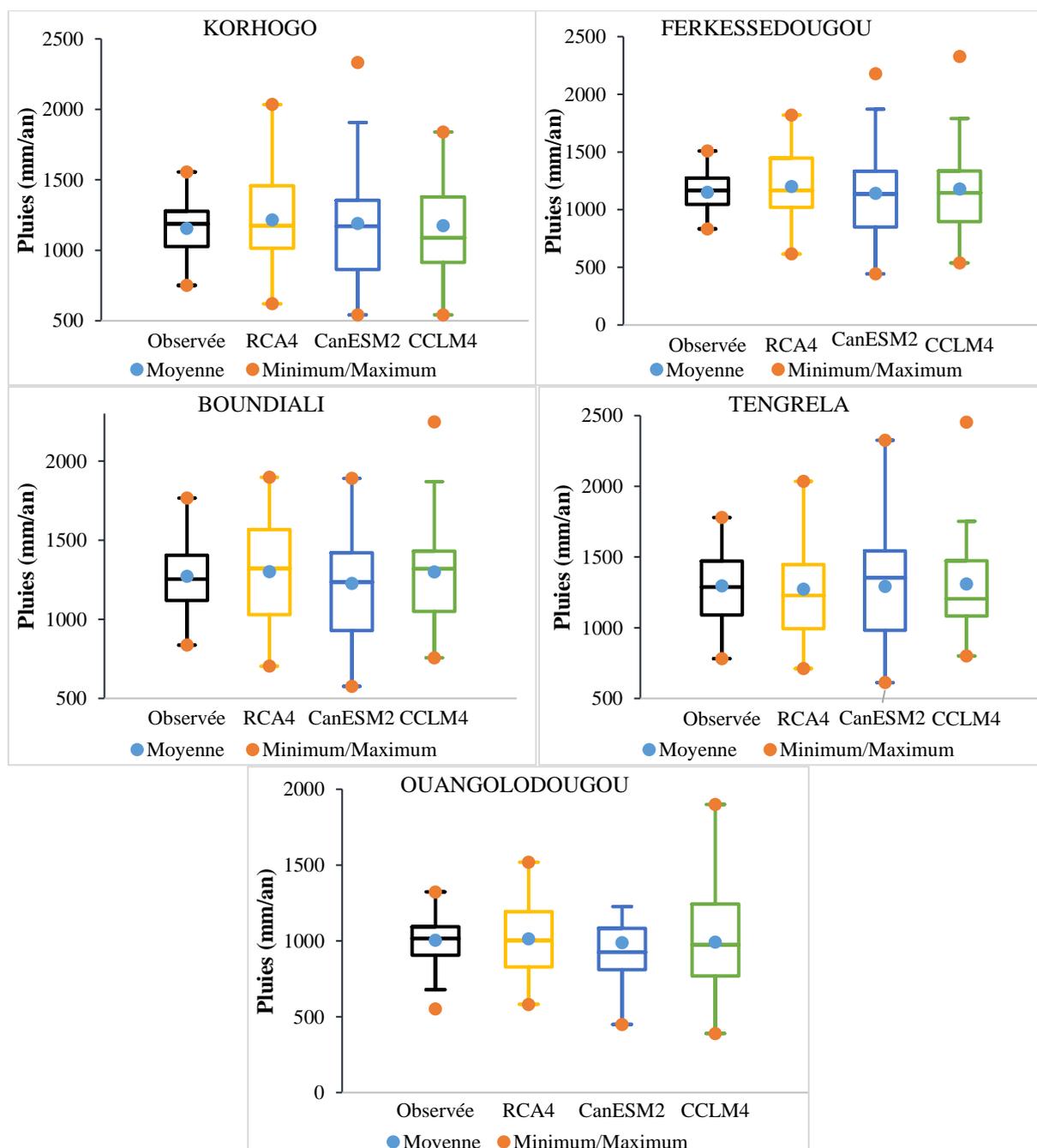


Figure 48 : Comparaison entre les pluies annuelles simulées corrigées et les pluies annuelles observées sur la période de référence 1976-2005

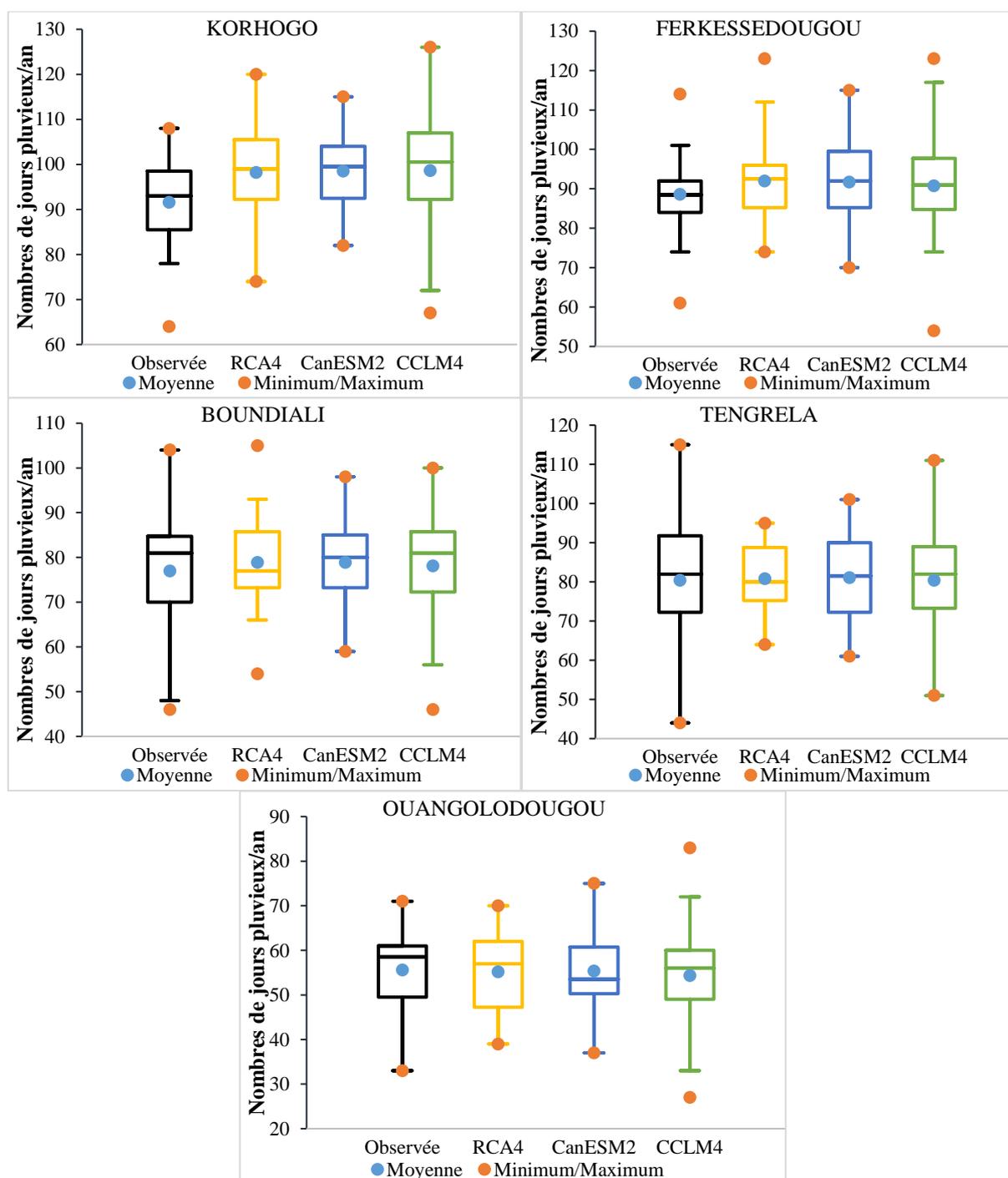


Figure 49 : Comparaison entre le nombre de jours pluvieux simulés corrigés et le nombre de jours pluvieux observés sur la période de référence 1976-2005

5.3.4.2. Analyse des températures observées et simulées sur la période 1976-2005

La figure 50 compare les températures simulées corrigées à celles observées aux stations de Korhogo, Ferkessédougou, Boundiali, Tengréla et Ouangolodougou pour les trois MCR. Les modèles RCA4, CanESM2 et CCLM4 reproduisent fidèlement les températures observées. Les températures observées sont légèrement supérieures aux températures simulées pour les trois MCR aux stations de Ferkessédougou (pour les Tmin) et Ouangolodougou (pour les Tmax).

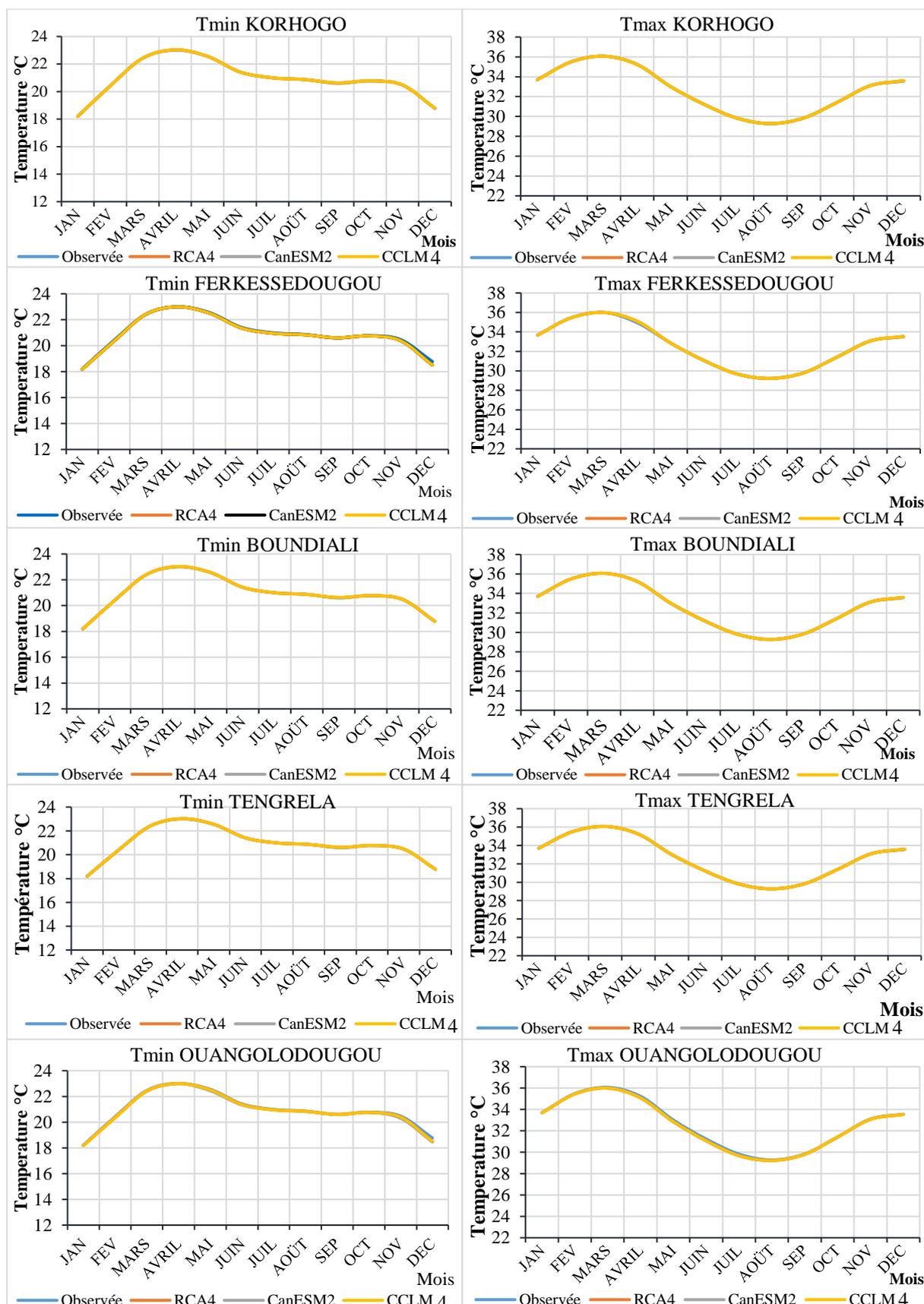


Figure 50 : Comparaison des températures moyennes mensuelles simulées corrigées et les températures moyennes mensuelles observées sur la période de référence 1976-2005

5.3.5. Analyse des paramètres climatiques sur la période 2021-2050

5.3.5.1. Évolution des précipitations sur la période 2021-2050

L'analyse de la figure 54 montre que les modèles indiquent une baisse des précipitations sur la période 2021-2050 (selon le scénario RCP4.5) excepté le modèle RCA4 qui indique une légère augmentation des précipitations. Selon le 3^{ème} quartile, 75 % des hauteurs de pluies mensuelles seront inférieures à 152 mm, 141 mm et 125 mm respectivement selon les MCR RCA4, CanESM2 et CCLM4. On constate une homogénéité des pluies mensuelles selon les modèles CanESM2 et CCLM4 sur l'ensemble des stations étudiées.

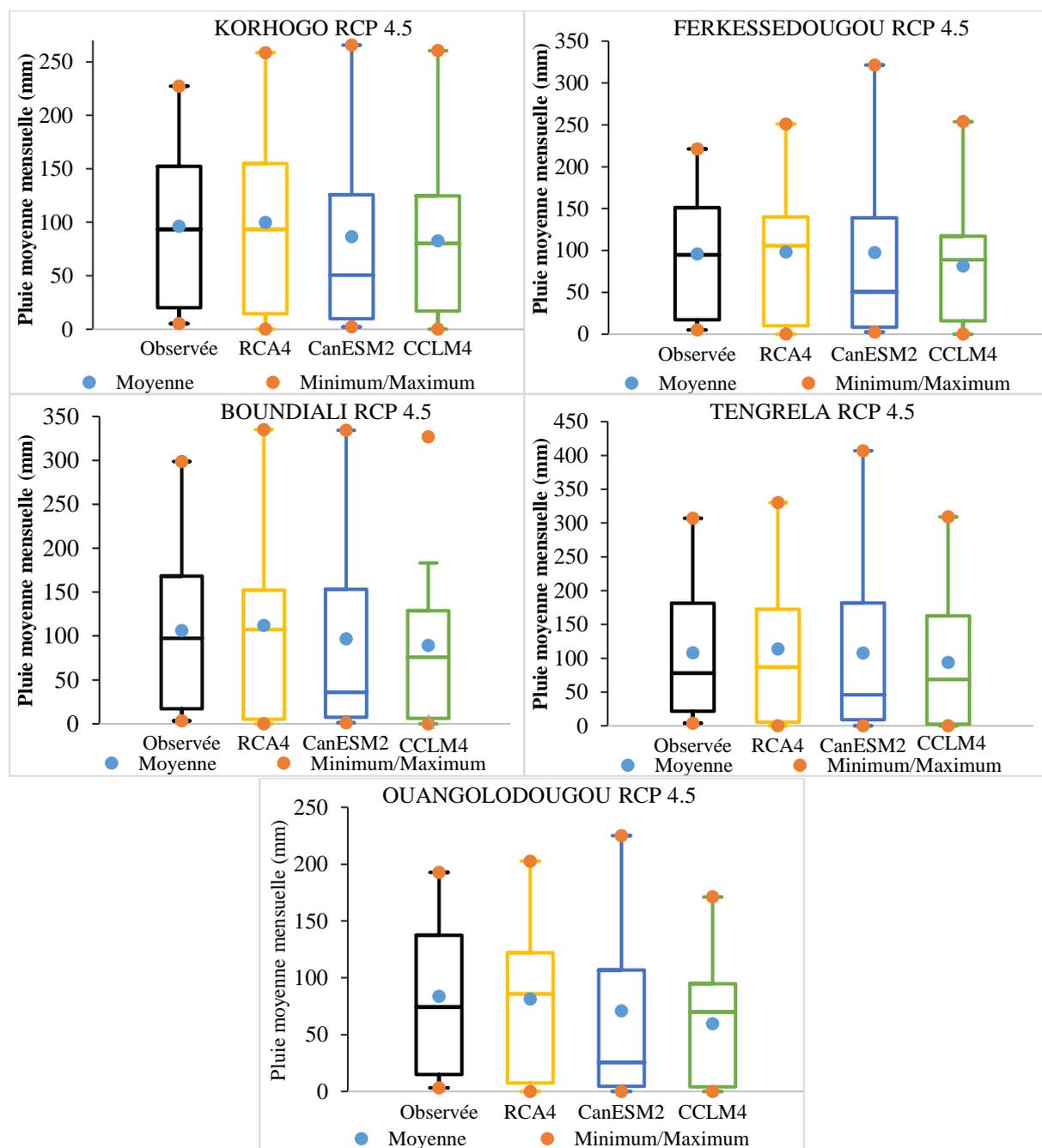
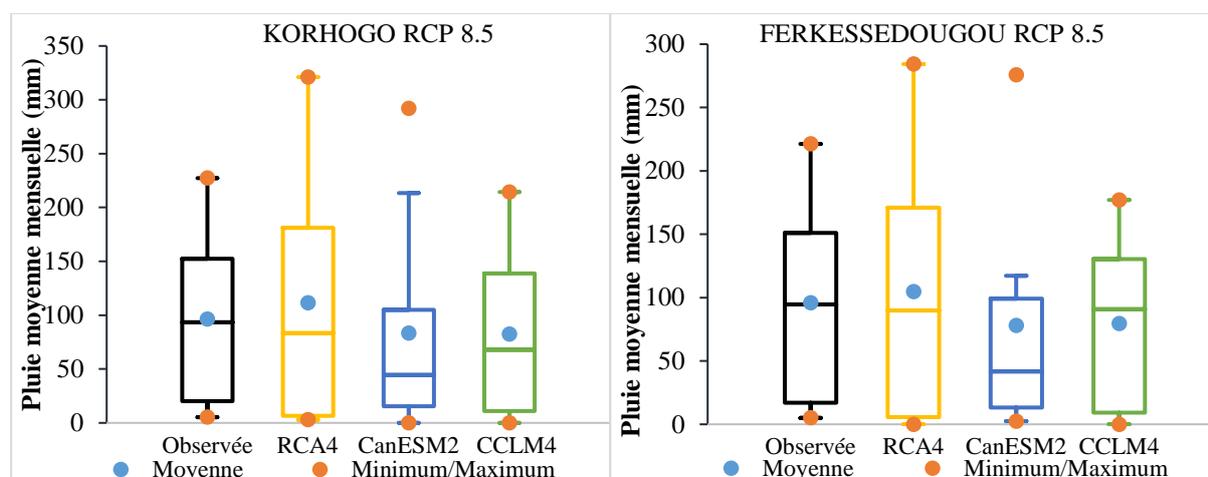


Figure 51 : Comparaison des pluies moyennes mensuelles sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP4.5 aux pluies moyennes mensuelles observées sur la période 1986-2016

En ce qui concerne le scénario RCP8.5, les 3 modèles climatiques indiquent une baisse générale des précipitations sur la période 2021-2050 par rapport à la période 1986-2016. Les précipitations sur la période 2021-2050 seront plus homogènes par rapport à la période de référence selon les modèles CanESM2 et CCLM4 sur l'ensemble des stations étudiées. La baisse des précipitations est beaucoup plus accentuée avec le modèle CanESM2 pour le scénario RCP8.5 (Figure 52).



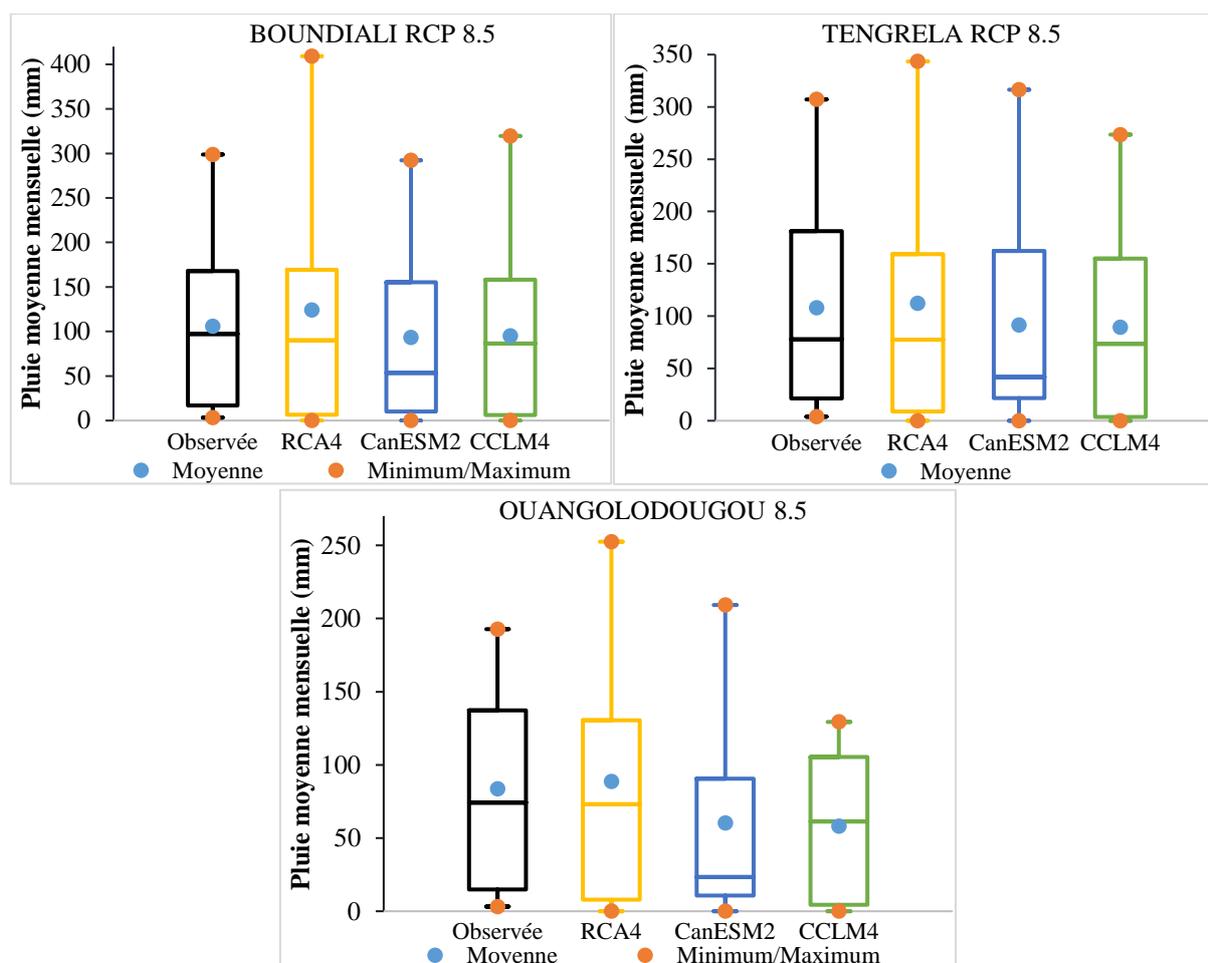


Figure 52 : Comparaison des pluies moyennes mensuelles sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5 aux pluies moyennes mensuelles observées sur la période 1986-2016

5.3.5.2. Analyse des nombres de jour pluvieux sur la période 2021-2050

La figure 53 et la figure 54 montrent le nombre de jours pluvieux annuels. Selon les trois modèles étudiés, le nombre de jours pluvieux est en baisse sur la période 2021-2050 par rapport à la période 1986-2050 et sera en dessous de 80 jours. Cette baisse des jours pluvieux annuels est très accentuée avec le modèle CanESM2. L'on observe des jours pluvieux d'environ 53, 56, 49, 49 et 29 jours/an respectivement à la station de Korhogo, Ferkessédougou, Boundiali, Tengréla et Ouangolodougou selon le scénario RCP4.5. Selon le scénario RCP8.5, on a 50, 56, 50, 66 et 28 jours pluvieux par an respectivement en ces mêmes stations.

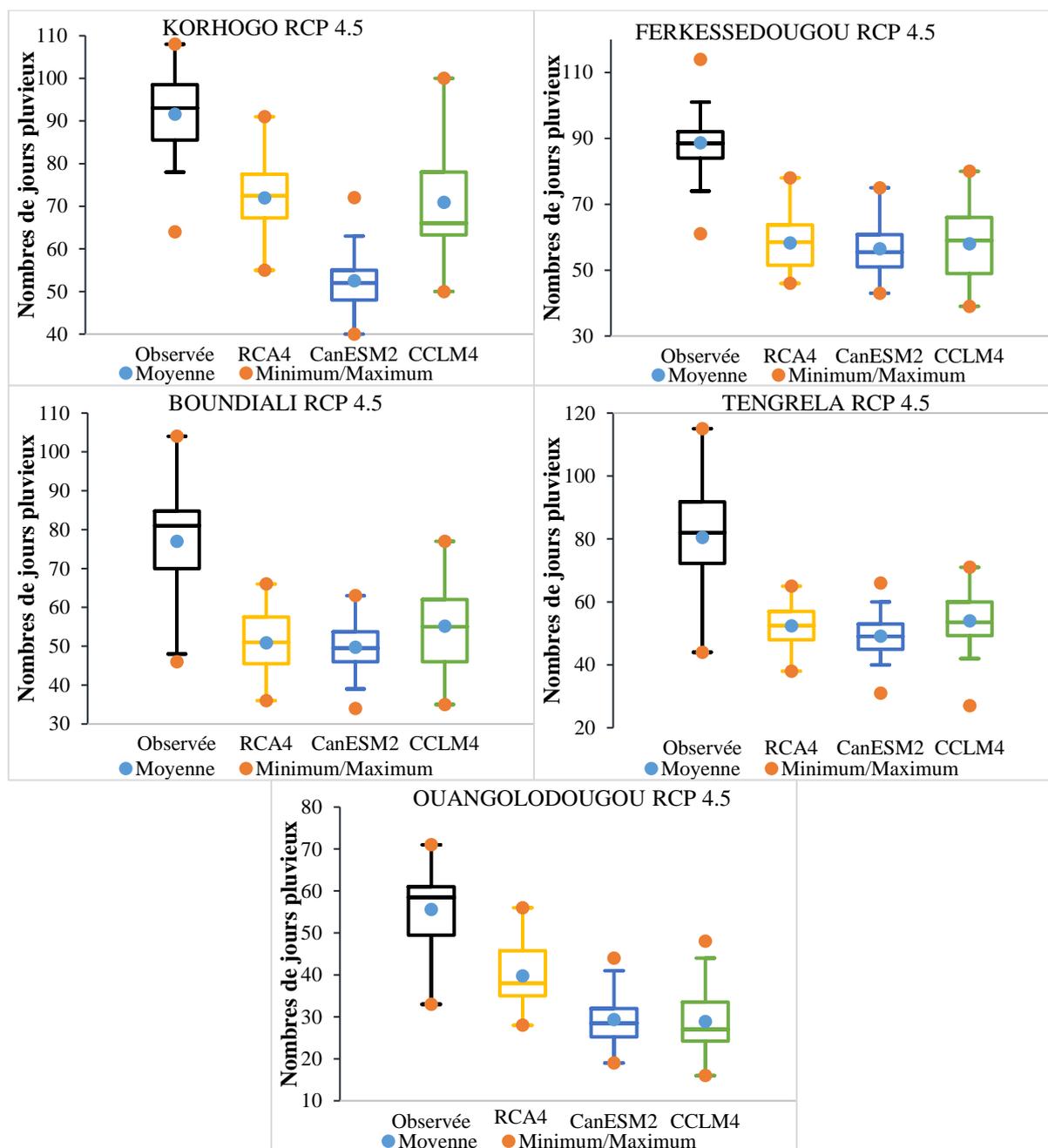


Figure 53 : Comparaison entre les nombres de jour pluvieux sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP4.5 et le nombre de jours pluvieux observées sur la période 1986-2016

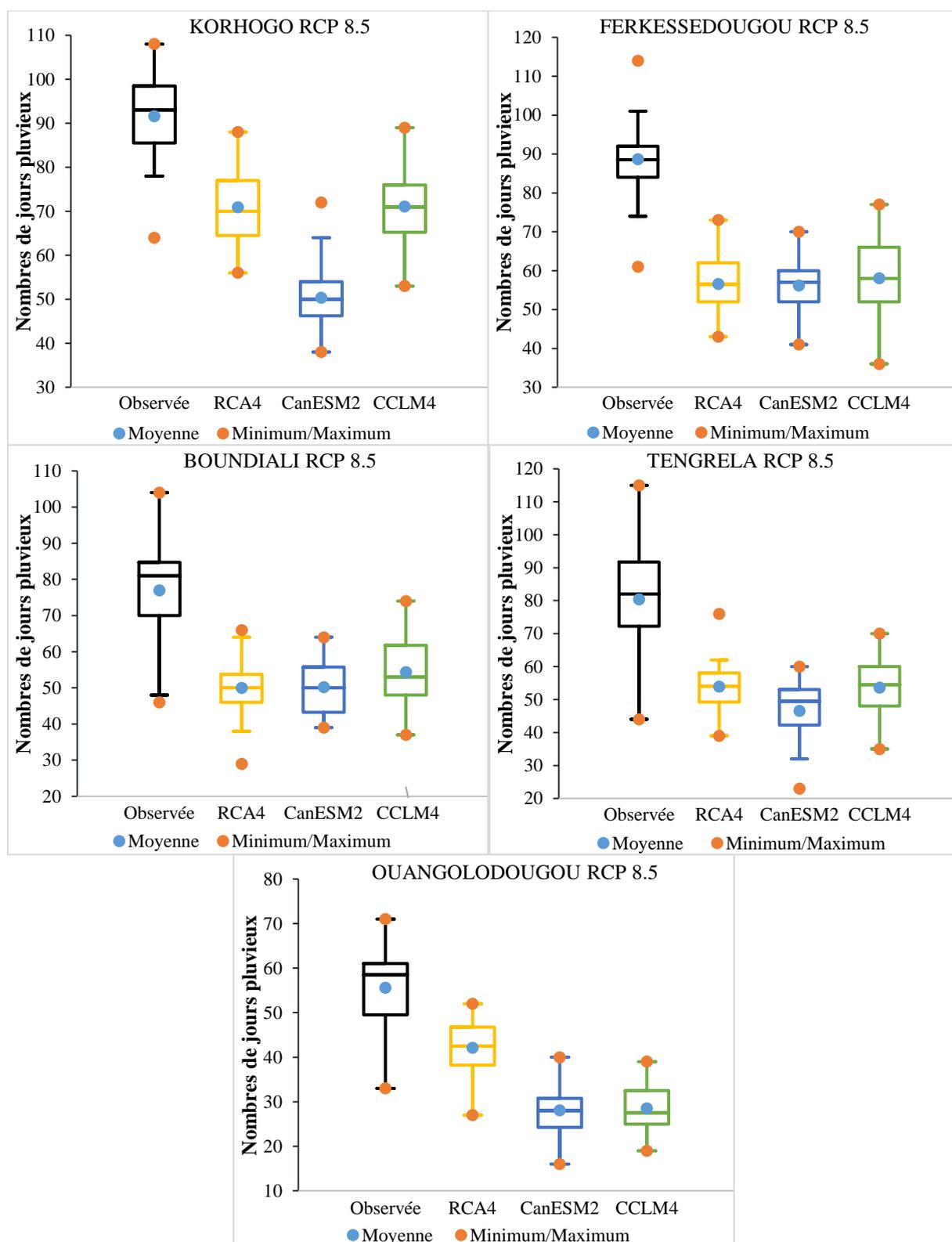


Figure 54 : Comparaison entre le nombre de jours pluvieux sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5 et le nombre de jours pluvieux observées sur la période 1986-2016

5.3.6. Variations des pluies et des températures sur la période 2021-2050

5.3.6.1. Taux de variation des pluies sur la période 2021-2050

Le tableau XIX et le tableau XX présentent les taux de variation mensuelle et annuelle des précipitations simulées par les trois modèles climatiques respectivement selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. L'analyse de ces taux de variation pour les différentes hauteurs de précipitations moyennes mensuelles montre une variation non homogène d'un mois à l'autre pour un même scénario climatique. On note de façon générale une diminution des intensités des précipitations en début et fin des saisons pluvieuses et une augmentation des intensités de pluie au milieu de la saison pluvieuse sur l'ensemble des stations étudiées.

La variation des précipitations moyennes annuelles pour les trois modèles varie de -30,7 à 17,1 %. De façon spécifique, le modèle RCA4 aura des variations comprises de -2,9 à 5,7 % (respectivement comme pic à la station de Ouangolodougou et Boundiali) pour le scénario RCP4.5 et de 3,9 à 17,1 % (respectivement à la station de Tengréla et Boundiali) pour le scénario RCP8.5. Le modèle CanESM2 montre des taux de variation des précipitations moyennes annuelles allant de 1,7 % à -15,3 (respectivement comme pic à la station de Ferkessédougou et Ouangolodougou) pour le scénario RCP4.5 et de -28 à -12,1 % (respectivement comme pic à la station de Ouangolodougou et Boundiali) pour le scénario RCP8.5. Le modèle CCLM4 quant à lui, présente un taux de variation compris de -28,9 à -13,3 % (respectivement comme pic à la station de Ouangolodougou et Tengréla) pour le scénario RCP4.5 et de -30,7 à -10,4 % (respectivement comme pic à la station de Ouangolodougou et Boundiali) pour le scénario RCP8.5. Enfin parmi les modèles étudiés, seul le modèle RCA4 montre une augmentation des pluies moyennes annuelles sur la période 2021-2050.

Tableau XIX : Taux de variation des pluies sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP4.5

TAUX DE VARIATION EN %									
MOIS	KORHOGO RCP 4.5			FERKESSEDOUGOU RCP 4.5			BOUNDIALI RCP 4.5		
	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4
JAN	-64,7	-73,7	-100	-100	-63,9	-100	-100	-84,5	-100
FEV	-49,8	-19,3	-100	-48,6	-54,3	43,4	-55,7	-29,5	-100
MARS	-36,3	-31	-48,9	-29,7	-46	-43,2	-12,2	-43,7	-81,2
AVRIL	-2,1	-21,6	-31,4	21,4	-4,2	-18,3	17,7	-48	-36,3
MAI	11,8	-27,6	12,7	5,5	-38,6	-2,2	5,2	-16	-12
JUIN	-25,6	-23,2	-17,5	-22,4	-11,7	-17,4	-23,5	-19,3	-22,9
JUIL	20	41,6	-45	-2,5	69,8	-43,2	20,1	10,7	-35,7
AOÛT	13,8	6,3	14,6	11,7	45,3	14,7	12,1	11,9	9,4
SEP	11,6	-11,4	-24	17,9	-14,3	-28,7	11	17,1	-6
OCT	11,4	-65,5	19	7,6	-71,6	6,3	15,5	-74,2	-8,3
NOV	-23,6	-56	0,8	-41,3	-50,2	-23,2	-71,3	-65	26
DEC	-100	-37,5	-100	-100	-43,6	-100	-100	-68,9	-100
Annuel	3,7	-10,2	-14,2	2,1	1,7	-15,2	5,7	-9,4	-15,9

TENGRELA RCP 4.5							OUANGOLODOUGOU RCP 4.5		
MOIS	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4			
JAN	-100	-100	-100	-100	-100	-100			
FEV	-70,6	-81,2	-100	-77,1	-91,1	-100			
MARS	-29,1	-54,6	-90,7	-29,5	-87,2	-88,1			
AVRIL	27,8	23,6	-11,7	17	-59,2	-0,3			
MAI	-22,5	-28,6	-30,7	-17,4	-47,6	-32,6			
JUIN	-19,4	0,9	-6,6	-27,7	44,5	-26,5			
JUIL	-0,1	11,6	-8,3	-19,7	9,9	-43,9			
AOÛT	7,6	32,5	0,6	5,1	16,8	-11,2			
SEP	52,6	-1,6	-19,6	68,3	-34,7	-33,8			
OCT	22,3	-86,5	-10,4	13,5	-74,5	2,1			
NOV	-76,1	-49,8	-14,8	-27	-12,5	-7,9			
DEC	-94,6	-100	-100	-100	-100	-100			
Annuel	5,3	-0,3	-13,3	-2,9	-15,3	-28,9			

Tableau XX : Taux de variation des pluies sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5

MOIS	TAUX DE VARIATION EN %								
	KORHOGO RCP 8.5			FERKESSEDOUGOU RCP 8.5			BOUNDIALI RCP 8.5		
	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4
JAN	-27,5	-100	-100	-100	-64,1	-100	-100	-100	-100
FEV	-44,5	-34,7	-100	-43,1	-15,1	-100	-20,9	5,9	-100
MARS	55,2	-10,1	-67	31,2	-42	-64,7	81,9	-76,5	-81,4
AVRIL	-5,6	-46,8	-35,1	26	-56,1	-10,4	21,4	-50,8	4,8
MAI	37,8	-33,5	1,1	30	-22,9	-1,9	30,6	-31	-22,8
JUIN	-22,1	-42,6	-4,2	-18,2	-50,7	-16,7	-21,8	-12,4	-3,8
JUIL	34,2	55,7	-19,6	32,7	52,5	-8,4	31,1	8,5	-18,1
AOÛT	41,3	-6,1	-5,7	28,5	8,1	-24,8	36,9	-2,2	7
SEP	17,1	-12,4	-9,1	-0,6	-44,9	-16,9	20,8	4,3	-10,9
OCT	-15	-56,9	-20,9	-32,2	-55,6	2,3	-29	-41	-7,9
NOV	-78,5	-22,1	51,2	-84,6	-23,6	-36,3	-82,8	-53,2	0
DEC	-45,5	-28,3	-100	-100	45,7	-100	-100	-100	-100
Annuel	15,8	-13,4	-14,5	9,2	-18,5	-17,1	17,1	-12,1	-10,4

MOIS	OUANGOLODOUGOU RCP 8.5					
	TENGRELA RCP 8.5			OUANGOLODOUGOU RCP 8.5		
	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4
JAN	-100	-100	-100	-66,3	-100	-100
FEV	-1,6	5,1	-100	-38,3	-31,6	-100
MARS	26	23,8	-85,2	16,9	-67,4	-82,9
AVRIL	27,2	-56,3	4,9	28,1	-64,3	-33,6
MAI	9,9	-59,3	-19,6	26,2	-50,8	-24,3
JUIN	-22,9	-4,8	-12,7	-34	-36,2	-24,6
JUIL	12,1	-9,4	-15,4	5,5	11,3	-31,2
AOÛT	11,8	3	-10,9	31	-5,2	-39,8
SEP	14,8	-21,6	-19,4	2,8	-20	-7,7
OCT	-23,5	-31	-14,1	-16,8	-82,9	4,2
NOV	-64,1	-83,2	-44,5	-76,9	35,5	-50,6
DEC	-100	-38,5	-100	-100	-100	-100
Annuel	3,9	-16,89	-17,2	5,7	-28	-30,7

5.3.6.2. Taux de variation des températures sur la période 2021-2050

- Taux de variation des températures minimales

Le tableau XXI et le tableau XXI présentent les taux de variation des températures minimales simulées selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 sur la période 2021-2050. Les trois modèles sont en accord avec l'augmentation des températures minimales futures. Cette augmentation est d'autant plus accentuée en période humide (avril, mai, juin, juillet, aout, septembre et octobre) qu'en période sèche (janvier, février, mars, novembre et décembre). Les températures minimales annuelles sur la période 2021-2050 augmenteront dans l'ordre de 0,07 à 0,09 °C selon le scénario RCP4.5 (Tableau XXI) tandis que le scénario RCP8.5 prévoit une augmentation des températures minimales annuelles dans l'ordre de 0,07 à 0,1 °C dans le bassin versant du Haut Bandama à Badikaha (Tableau XXII).

Tableau XXI : Taux de variation des températures minimales (°C) sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP4.5

TAUX DE VARIATION EN °C									
KORHOGO RCP 4.5			FERKESSEDOUGOU RCP 4.5			BOUNDIALI RCP 4.5			
MOIS	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4
JAN	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,08
FEV	0,04	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07	0,04	0,08	0,07
MARS	0,04	0,05	0,05	0,03	0,05	0,05	0,04	0,06	0,04
AVRIL	0,07	0,08	0,07	0,06	0,08	0,06	0,06	0,09	0,06
MAI	0,10	0,10	0,06	0,09	0,10	0,05	0,09	0,10	0,06
JUIN	0,14	0,11	0,07	0,14	0,11	0,06	0,14	0,11	0,07
JUIL	0,12	0,09	0,10	0,11	0,09	0,09	0,11	0,10	0,10
AOÛT	0,10	0,09	0,10	0,10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10
SEP	0,11	0,09	0,09	0,10	0,08	0,09	0,11	0,09	0,09
OCT	0,04	0,06	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,06	0,05
NOV	0,02	0,04	0,03	0,02	0,05	0,03	0,02	0,05	0,03
DEC	0,05	0,11	0,09	0,07	0,12	0,10	0,06	0,12	0,09
Annuel	0,08	0,0	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,09	0,07
TENGRELA RCP 4.5			OUANGOLODOUGOU RCP 4.5						
MOIS	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4			
JAN	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07			
FEV	0,05	0,09	0,07	0,06	0,09	0,06			
MARS	0,03	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03			
AVRIL	0,05	0,08	0,06	0,05	0,09	0,05			
MAI	0,08	0,09	0,06	0,08	0,10	0,08			
JUIN	0,14	0,11	0,06	0,14	0,11	0,14			
JUIL	0,11	0,09	0,09	0,11	0,09	0,11			
AOÛT	0,09	0,08	0,09	0,10	0,08	0,10			
SEP	0,11	0,09	0,09	0,10	0,08	0,10			
OCT	0,03	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04			
NOV	0,02	0,05	0,03	0,02	0,05	0,02			
DEC	0,07	0,13	0,09	0,08	0,13	0,08			
Annuel	0,07	0,08	0,07	0,07	0,09	0,07			

Tableau XXII : Taux de variation des températures minimales sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5

TAUX DE VARIATION EN °C									
MOIS	KORHOGO RCP 8.5			FERKESSEDOUGOU RCP 8.5			BOUNDIALI RCP 8.5		
	RCA 4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4
JAN	0,08	0,07	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09
FEV	0,04	0,10	0,05	0,05	0,10	0,06	0,04	0,10	0,06
MARS	0,05	0,07	0,07	0,05	0,07	0,06	0,05	0,07	0,05
AVRIL	0,09	0,10	0,07	0,08	0,09	0,06	0,07	0,11	0,06
MAI	0,11	0,12	0,06	0,11	0,13	0,05	0,10	0,12	0,06
JUIN	0,17	0,12	0,07	0,17	0,13	0,06	0,17	0,12	0,08
JUIL	0,15	0,10	0,12	0,15	0,10	0,11	0,14	0,11	0,12
AOÛT	0,11	0,10	0,11	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11
SEP	0,14	0,10	0,11	0,13	0,10	0,10	0,14	0,11	0,11
OCT	0,05	0,07	0,06	0,05	0,07	0,06	0,05	0,07	0,06
NOV	0,04	0,05	0,05	0,04	0,06	0,05	0,03	0,06	0,05
DEC	0,09	0,12	0,11	0,10	0,13	0,12	0,09	0,13	0,11
Annuel	0,09	0,09	0,08	0,09	0,10	0,08	0,09	0,10	0,08
TENGRELA RCP 8.5									
OUANGOLODOUGOU RCP8.5									
MOIS	RC A4	CanESM 2	CCLM 4	RCA 4	CanESM2	CCLM4			
JAN	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,09			
FEV	0,05	0,10	0,06	0,06	0,11	0,06			
MARS	0,05	0,07	0,05	0,05	0,07	0,05			
AVRIL	0,05	0,09	0,05	0,06	0,09	0,06			
MAI	0,08	0,11	0,06	0,09	0,12	0,05			
JUIN	0,16	0,12	0,07	0,17	0,12	0,07			
JUIL	0,14	0,10	0,11	0,15	0,10	0,10			
AOÛT	0,10	0,10	0,11	0,11	0,10	0,10			
SEP	0,13	0,10	0,10	0,13	0,10	0,10			
OCT	0,04	0,07	0,05	0,05	0,07	0,05			
NOV	0,03	0,06	0,05	0,04	0,06	0,05			
DEC	0,09	0,14	0,11	0,11	0,15	0,12			
Annuel	0,09	0,10	0,08	0,09	0,10	0,07			

- **Taux de variation des températures maximales**

Le tableau XXIII et le tableau XXIV présentent les taux de variation des températures maximales simulées respectivement selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 sur la période 2021-2050. Les trois modèles sont unanimes sur l'augmentation des températures maximales futures. Cette augmentation est pour la plupart plus accentuée en période humide (Avril, Mai, Juin, Juillet, Août, Septembre et Octobre) qu'en période sèche (Janvier, Février, Mars, Novembre Et Décembre). Les températures maximales annuelles sur la période 2021-2050 augmenteront dans l'ordre de 0,03 à 0,04 °C selon le scénario RCP4.5 et pratiquement dans le même ordre, le

scénario RCP8.5 prévoit une augmentation des températures maximales annuelles de 0,03 à 0,05 °C dans le bassin versant du Haut Bandama à Badikaha.

Tableau XXIII : Taux de variation des températures maximales sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP4.5

TAUX DE VARIATION EN °C									
KORHOGO RCP 4.5			FERKESSEDOUGOU RCP 4.5			BOUNDIALI RCP 4.5			
MOIS	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4
JAN	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03
FEV	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
MARS	0,04	0,02	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,04
AVRIL	0,02	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03
MAI	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02
JUIN	0,05	0,05	0,02	0,05	0,05	0,02	0,06	0,05	0,02
JUIL	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04
AOÛT	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03
SEP	0,03	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03
OCT	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02
NOV	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
DEC	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03
Annuel	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03
TENGRELA RCP 4.5			OUANGOLODOUGOU RCP 4.5						
MOIS	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4			
JAN	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04			
FEV	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04			
MARS	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04			
AVRIL	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02			
MAI	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02			
JUIN	0,06	0,04	0,02	0,05	0,05	0,05			
JUIL	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05			
AOÛT	0,04	0,05	0,03	0,04	0,05	0,04			
SEP	0,03	0,04	0,03	0,03	0,05	0,03			
OCT	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03			
NOV	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04			
DEC	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04			
Annuel	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04			

Tableau XXIV : Taux de variation des températures maximales sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5

TAUX DE VARIATION EN °C									
KORHOGO RCP 8.5			FERKESSEDOUGOU RCP 8.5			BOUNDIALI RCP 8.5			
MOIS	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4
JAN	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04
FEV	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
MARS	0,03	0,02	0,05	0,04	0,02	0,05	0,04	0,02	0,05
AVRIL	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
MAI	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
JUIN	0,07	0,06	0,02	0,07	0,05	0,02	0,07	0,05	0,02
JUIL	0,07	0,05	0,04	0,07	0,05	0,04	0,07	0,05	0,05
AOÛT	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06	0,03	0,05	0,06	0,03
SEP	0,05	0,05	0,03	0,05	0,05	0,03	0,05	0,05	0,03
OCT	0,04	0,04	0,02	0,03	0,04	0,02	0,04	0,04	0,02
NOV	0,05	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04
DEC	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04
Annuel	0,05	0,04	0,03	0,05	0,04	0,03	0,05	0,04	0,03
TENGRELA RCP 8.5			OUANGOLODOUGOU RCP 8.5						
MOIS	RCA4	CanESM2	CCLM4	RCA4	CanESM2	CCLM4			
JAN	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04			
FEV	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03			
MARS	0,05	0,03	0,05	0,04	0,02	0,05			
AVRIL	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03			
MAI	0,03	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02			
JUIN	0,07	0,04	0,02	0,07	0,04	0,02			
JUIL	0,07	0,05	0,05	0,07	0,05	0,04			
AOÛT	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,03			
SEP	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03			
OCT	0,04	0,04	0,02	0,03	0,05	0,02			
NOV	0,07	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04			
DEC	0,05	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04			
Annuel	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03			

5.4. Variabilité climatique sur la période 2021-2050

5.4.1. Sécheresse pluviométrique sur la période 2021-2050 selon les modèles CanESM2

Les figures 55, 56 et 57 montrent les Indices Standardisés de Précipitations (SPI) utilisés pour l'évaluation de la sécheresse pluviométrique sur la période 2021-2050 simulée par les 3 modèles climatiques à savoir CanESM2, CCLM4 et RCA4. Les SPI, à travers les sorties de modèles CanESM2 et RCA4 selon le scénario RCP4.5 montrent que la période 2021-2050 débutera avec une séquence de sécheresse intense qui part de 2023 à 2038 sur la majorité des stations étudiées (Figure 55 et figure 56). De 2038 à 2050, ces deux modèles montrent une période humide sur l'ensemble des stations étudiées sauf la station de Ouangolodougou qui affiche une sécheresse intense sur la période 2041 à 2044 et 2048 à 2050 selon le modèle CanESM2. Le modèle CCLM4 quant à lui montre une alternance de périodes sèches et humides tout au long de la période 2021-2050 (Figure 57).

Le scénario RCP8.5 des modèles CanESM2 et CCLM4 affichent en début de la période (2021-2029 par le modèle CanESM2, 2021-2034 par le modèle CCLM4) une période humide. Au-delà, les modèles affichent une période de sécheresse intense dans l'ensemble. A l'exception de la station de Ouangolodougou, la période de sécheresse part de 2026 à 2040, selon le modèle CanESM2. Cependant, le modèle RCA4, pour le même scénario RCP8.5 affiche deux périodes humides séparées par une période de sécheresse intense qui part de 2029 à 2043 sur la majorité des stations.

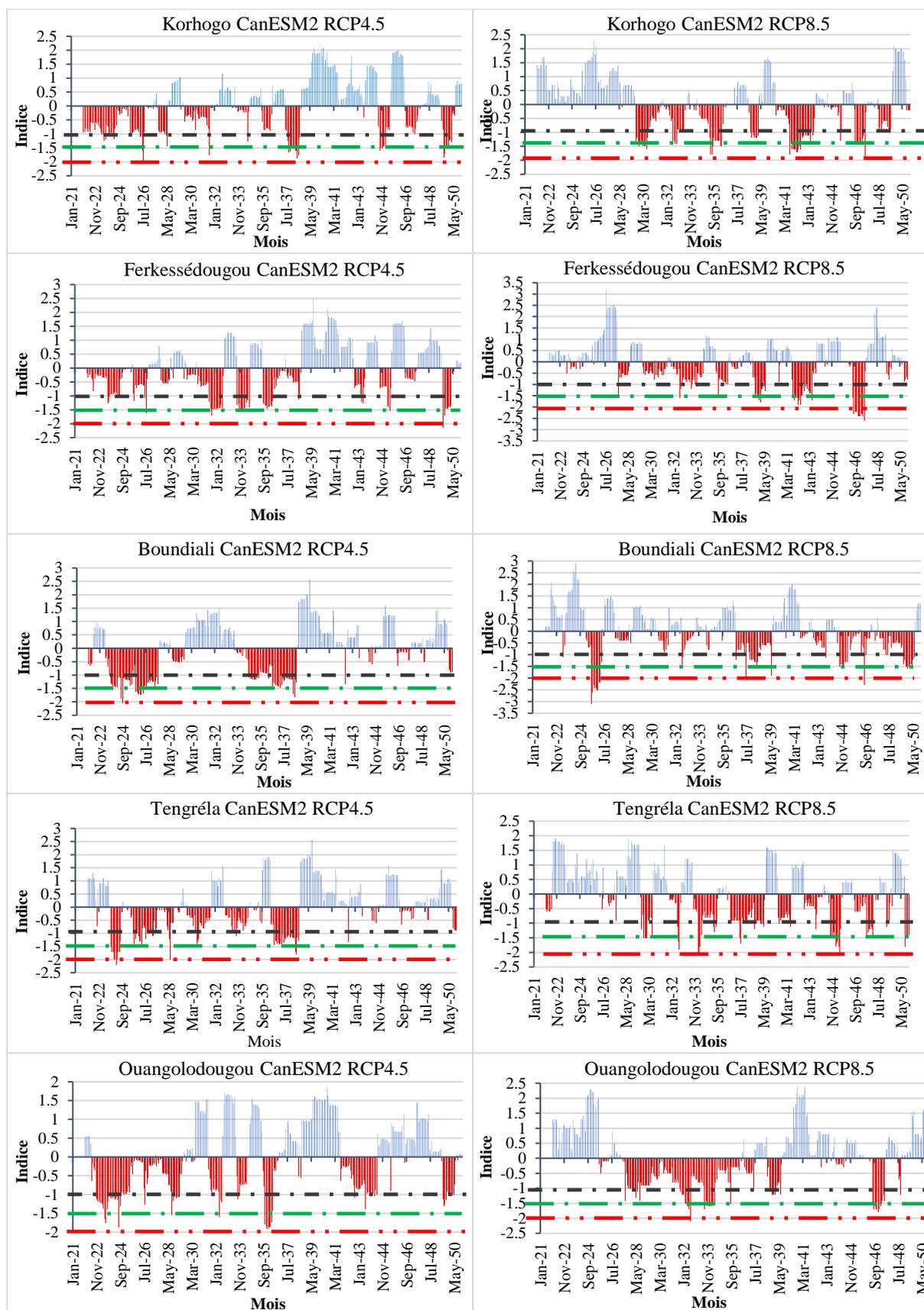


Figure 55 : Évolution mensuelle des indices de sécheresse selon le modèle CanESM2 sur la période 2021-2050

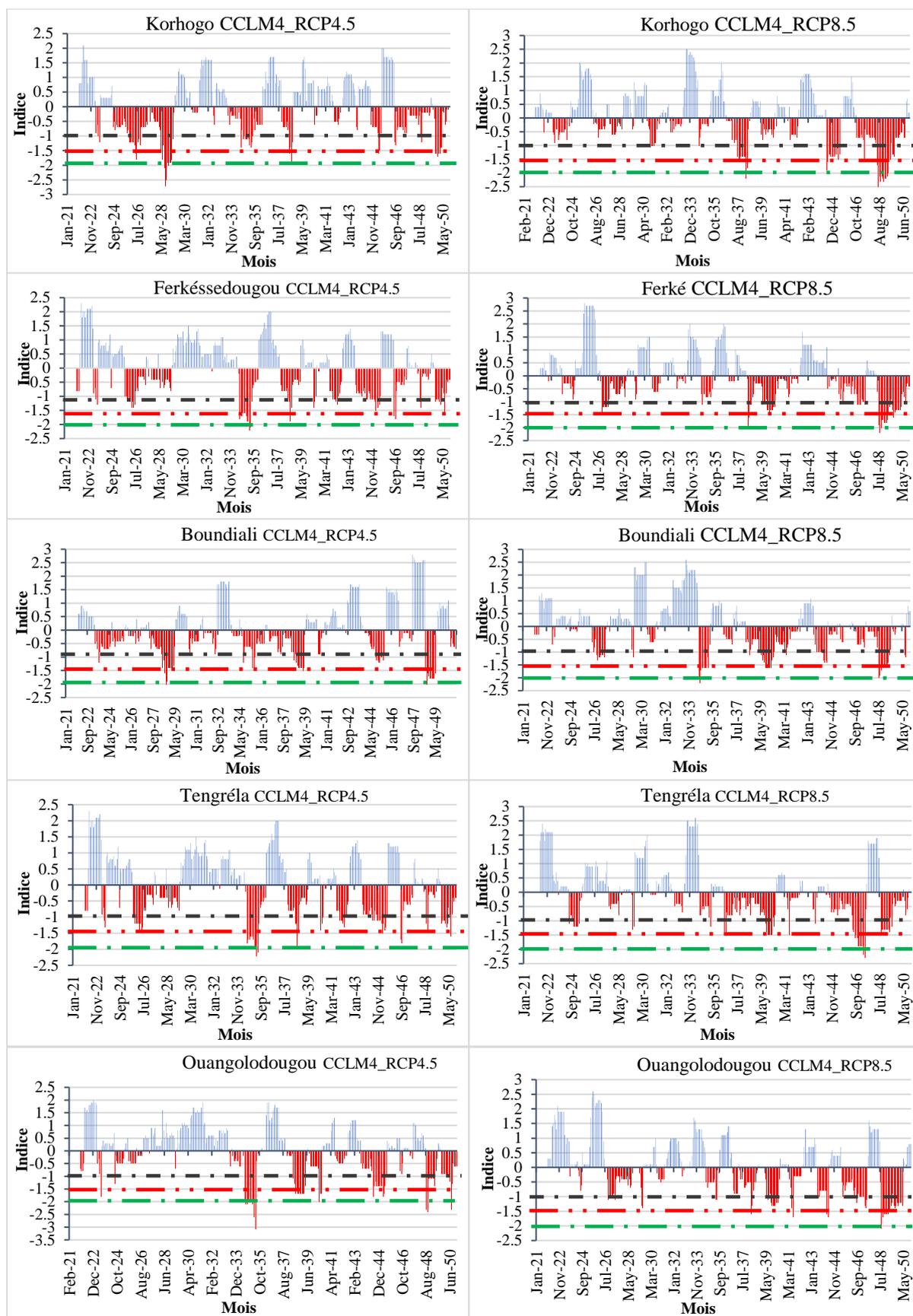


Figure 56 : Évolution mensuelle des indices de sécheresse selon le modèle CCLM4 sur la période 2021-2050

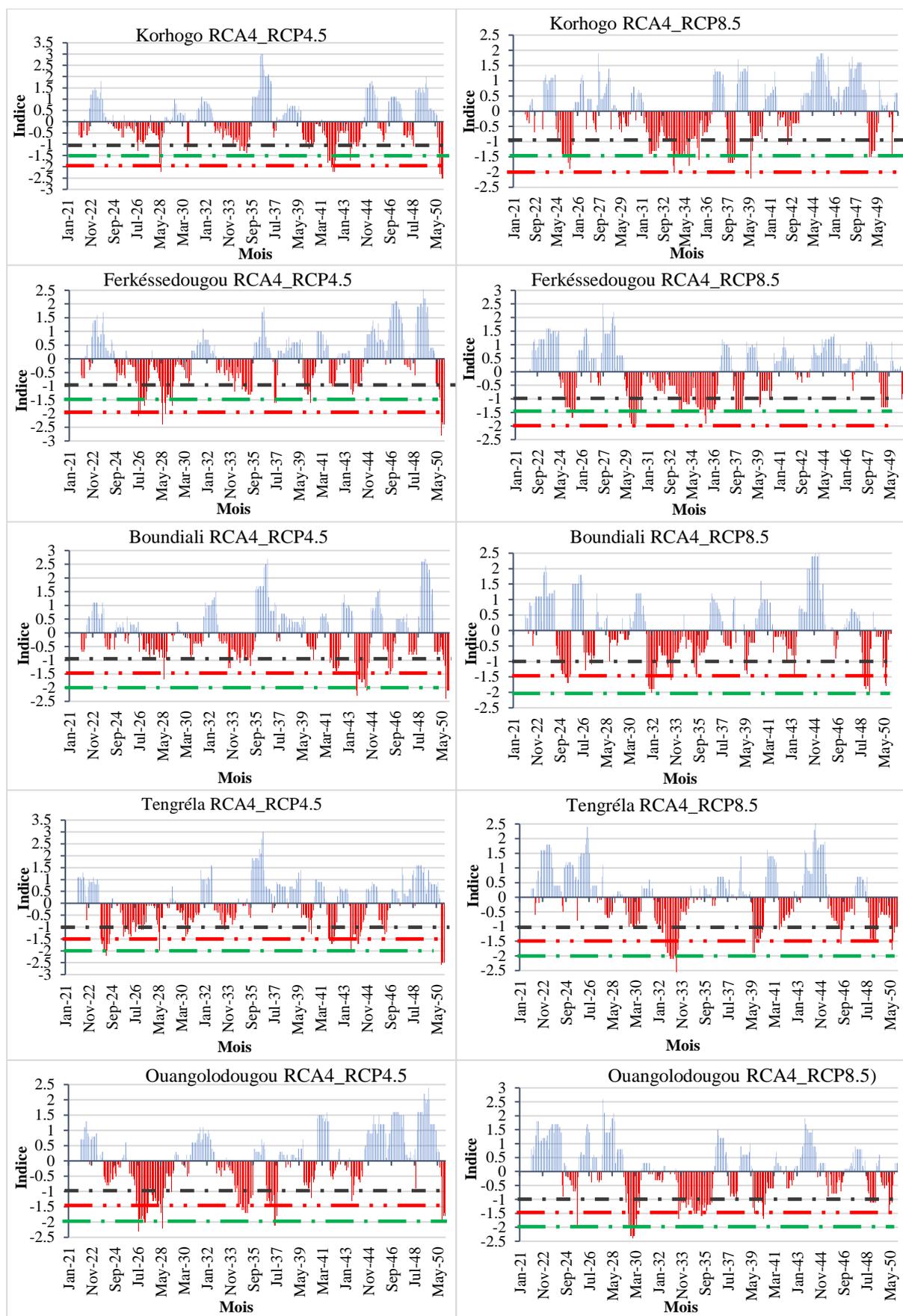


Figure 57 : Évolution mensuelle des indices de sécheresse selon le modèle RC4 sur la période 2021-2050

5.4.2. Occurrence des sécheresses annuelles sur la période 2021-2050

5.4.2.1. Analyse de la succession des années sèches et humides par le processus de Markov d'ordre 1

Le tableau XXV montre les probabilités de succession des années sèches et humides sur la période 2021-2050 selon les modèles RCA4, CanESM2 et CCLM4 à travers les scénarios RCP4.5 et RP8.5. L'analyse de la succession des années sèche a montré dans un premier temps que la probabilité d'observer une année sèche est de 0,51 en moyenne.

L'analyse montre que, selon le scénario RCP4.5 des trois modèles climatiques régionaux (MCR), les probabilités d'obtenir une année sèche après une année sèche (SS) sur la période 2021-2050 sur l'ensemble du bassin versant sont relativement élevées. Ces probabilités sont supérieures à celles d'une année humide après une année humide (HH). Excepté les stations de Ferkessédougou et Ouangolodougou pour les MCR, RCA4 et CCLM4 où les probabilités de succession de HH sont respectivement de 0,53 et 0,60 supérieures à celles de SS qui sont de 0,47 et 0,53. Le scénario RCP4.5 prévoit des probabilités d'obtention d'une année humide après une année sèche (SH) relativement faibles par rapport à celles d'une année sèche après une année humide (HS) variant entre $0,29 \leq SH \leq 0,53$ et $0,40 \leq HS \leq 0,69$ respectivement selon le MCR.

Concernant le scénario RCP8.5, la probabilité des événements est relativement faible par rapport à celle du scénario RCP4.5. Selon le scénario RCP8.5, les probabilités de SS sont également élevées (supérieures à 0,51 qui est la probabilité moyenne d'observer un événement sec) et supérieures à celles de HH pour les modèles CanESM2 et CCLM4. Cependant, au niveau du MCR RCA4, des probabilités de SS faibles (de 0,43 aux stations de Korhogo et Ferkessédougou) par rapport à celles de HH (0,50 à Korhogo et 0,56 à Ferkessédougou) sont prévu. Le scénario RCP8.5 prévoit dans l'ensemble des probabilités d'obtention d'une année humide après une année sèche (SH) relativement faibles par rapport à celles d'une année sèche après une année humide (HS) variant entre $0,29 \leq SH \leq 0,67$ et $0,40 \leq HS \leq 0,82$ respectivement selon le MCR.

Tableau XXV : Probabilité de succession des années sèches et humides par le processus de Markov d'ordre 1 sur la période 2021-2050

Station	MCR	RCA4 RCP 4.5				RCA4 RCP 8.5			
		SS	SH	HS	HH	SS	SH	HS	HH
Korhogo		0,53	0,41	0,54	0,46	0,43	0,57	0,44	0,50
Ferkessédougou		0,47	0,47	0,47	0,53	0,43	0,50	0,44	0,56
Boundiali		0,41	0,53	0,69	0,31	0,58	0,37	0,73	0,27
Tengréla		0,56	0,38	0,50	0,50	0,56	0,38	0,50	0,50
Ouangolodougou		0,63	0,31	0,43	0,57	0,50	0,50	0,44	0,50

Station	MCR	CanESM2 RCP 4.5				CanESM2 RCP 8.5			
		SS	SH	HS	HH	SS	SH	HS	HH
Korhogo		0,53	0,47	0,54	0,38	0,65	0,29	0,46	0,54
Ferkessédougou		0,56	0,44	0,58	0,33	0,47	0,47	0,53	0,47
Boundiali		0,59	0,41	0,46	0,46	0,56	0,44	0,50	0,43
Tengréla		0,53	0,40	0,40	0,60	0,38	0,56	0,64	0,36
Ouangolodougou		0,65	0,29	0,46	0,54	0,56	0,39	0,67	0,33

Station	MCR	CCLM4 RCP 4.5				CCLM4 RCP 8.5			
		SS	SH	HS	HH	SS	SH	HS	HH
Korhogo		0,59	0,35	0,54	0,46	0,33	0,67	0,67	0,27
Ferkessédougou		0,59	0,35	0,46	0,54	0,47	0,47	0,69	0,31
Boundiali		0,60	0,35	0,80	0,20	0,53	0,47	0,54	0,38
Tengréla		0,53	0,47	0,54	0,38	0,47	0,47	0,82	0,18
Ouangolodougou		0,53	0,40	0,40	0,60	0,60	0,40	0,80	0,10

SS = deux année successives sèches, SH = une année sèche suivie d'une année humide, HS = une année sèche précédée d'une année humide, HH = deux années successives humides

5.4.2.2. Analyse de la succession des années sèches et humides par le processus de Markov d'ordre 2 sur la période 2021-2050

Le tableau XXVI montre les probabilités de succession des années sèches et humides sur la période 2021-2050 selon les modèles RCA4, CanESM2 et CCLM4 à travers les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 par le processus de Markov d'ordre 2. On remarque que, selon le scénario RCP4.5 des trois MCR, les probabilités d'obtention d'une année sèche précédée de deux années successives sèches (SSS) sont relativement élevées (supérieures à 0,51 qui est la probabilité moyenne d'observer un évènement sec). Contrairement à ces stations les stations de Tengréla et Ouangolodougou, montrent des probabilités de succession de SSS faibles (de 0,38 et 0,33 respectivement) pour le MCR CCLM4. Le scénario RCP4.5 prévoit des probabilités d'obtention d'une année humide précédée de deux années successives sèches (SSH) relativement faibles ($0,20 \leq SSH \leq 0,67$ selon les MCR) par rapport à celles d'une année sèche après une année sèche, précédée d'une année humide (HSS) allant de $0,29 \leq HSS \leq 0,86$ selon les MCR. Au niveau des probabilités d'une année humide après une année sèche précédée d'une année humide (HSH), elles sont faibles à Korhogo (0,43) et Tengréla (0,33) pour RCA4, à Tengréla et

Ouangolodougou (0,33) pour CanESM2 et (respectivement de 0,14 et 0,17) pour CCLM4. Concernant le scénario RCP8.5, le MCR RCA4 montre des probabilités de SSS élevées dans les stations de Ferkessédougou et Ouangolodougou respectivement 0,83 et 0,57. Les probabilités des SSH sont faibles en général sur le BVHBKB. Cependant, les probabilités de HSS sont élevées aux stations de Boundiali et de Tengréla avec respectivement de 0,75 et 0,71. Les probabilités de HSH sont élevées sur l'ensemble des stations sauf pour les stations de Boundiali et Tengréla (0,25 et 0,29 respectivement). Le MCR CanESM2 montre des variations de probabilité de SSS comprise entre 0,33 et 0,80. Les stations de Ferkessédougou et Tengréla présentent respectivement des probabilités de 0,57 et 0,67 élevées pour SSH et celles de HSS également élevées à la station de Boundiali (0,57). Le MCR CCLM4 présente des probabilités de SSS en dessous de la probabilité moyenne d'observer un évènement sec (de 0,51) sauf au niveau des stations de Boundiali (0,78) et Ouangolodougou (0,58). Contrairement à ce dernier, les probabilités de HSH sont élevées sauf pour les stations de Tengréla (0,44) et Ouangolodougou (0,38).

Tableau XXVI : Probabilités de succession des années sèches et humides par le processus de Markov d'ordre 2 sur la période 2021-2050

Station	RCM	RCA4 RCP 4.5				RCA4 RCP 8.5			
		SSS	SSH	HSS	HSH	SSS	SSH	HSS	HSH
Korhogo		0,67	0,33	0,43	0,43	0,50	0,50	0,29	0,71
Ferkessédougou		0,71	0,29	0,29	0,57	0,83	0,17	0,14	0,71
Boundiali		0,57	0,29	0,33	0,67	0,45	0,45	0,75	0,25
Tengréla		0,78	0,22	0,29	0,57	0,44	0,44	0,71	0,29
Ouangolodougou		0,70	0,30	0,50	0,33	0,57	0,43	0,43	0,57
Station	RCM	CanESM2 RCP 4.5				CanESM2 RCP 8.5			
		SSS	SSH	HSS	HSH	SSS	SSH	HSS	HSH
Korhogo		0,67	0,33	0,29	0,71	0,73	0,27	0,50	0,33
Ferkessédougou		0,70	0,30	0,29	0,71	0,43	0,57	0,50	0,38
Boundiali		0,60	0,40	0,50	0,50	0,56	0,44	0,57	0,43
Tengréla		0,63	0,38	0,50	0,33	0,33	0,67	0,44	0,44
Ouangolodougou		0,64	0,27	0,67	0,33	0,80	0,20	0,25	0,63
Station	RCM	CCLM4 RCP 4.5				CCLM4 RCP 8.5			
		SSS	SSH	HSS	HSH	SSS	SSH	HSS	HSH
Korhogo		0,70	0,20	0,43	0,57	0,40	0,60	0,30	0,70
Ferkessédougou		0,50	0,40	0,83	0,17	0,50	0,38	0,44	0,56
Boundiali		0,67	0,33	0,50	0,38	0,78	0,22	0,29	0,71
Tengréla		0,33	0,67	0,86	0,14	0,44	0,44	0,56	0,44
Ouangolodougou		0,38	0,50	0,83	0,17	0,58	0,42	0,63	0,38

SSS =trois année successives sèches, SSH = deux années successives sèches suivies d'une année humide, HSS = deux années successives sèches précédées d'une année humide, HSH = une année sèche précédée d'une année humide et suivie d'une année sèche.

5.4.2.3. Variabilité spatiale de la sécheresse

L'analyse de la répartition spatiale de la sécheresse sur la période 2021-2050 concerne la succession des années sèches à travers les matrices de Markov d'ordre 1 et 2, selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

➤ Variabilité spatiale de la sécheresse par le processus de Markov 1

La figure 58 présente la répartition spatiale de la sécheresse sur le bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha selon les MCR RCA4, CanESM2 et CCLM4 et selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Le scénario RCP4.5 montre une intensification de deux années sèches successives sur le bassin versant (probabilité supérieure à 51 % : probabilité moyenne d'un événement sec). Le Nord du bassin versant est particulièrement touché selon les modèles MCR RCA4 et CanESM2 tandis que le modèle CCLM4 indique le phénomène touchant le Sud. Le scénario RCP8.5 indique une spatialisation de la sécheresse moins intense par rapport au scénario RCP4.5 et montre que l'Ouest et le Sud sont les zones les plus touchées par l'occurrence de la sécheresse de deux années successives pour le MCR RCA4 et CanESM2. Le modèle CCLM4 montre une persistance de la sécheresse dans le Nord et Nord-est du bassin versant du Haut Bandama à Badikaha.

Il faut noter que les modèles RCA4 et CanESM2 montrent que les complexes sucriers (FERKE1 et FERKE 2) sont moins touchés par deux années successives sèches.

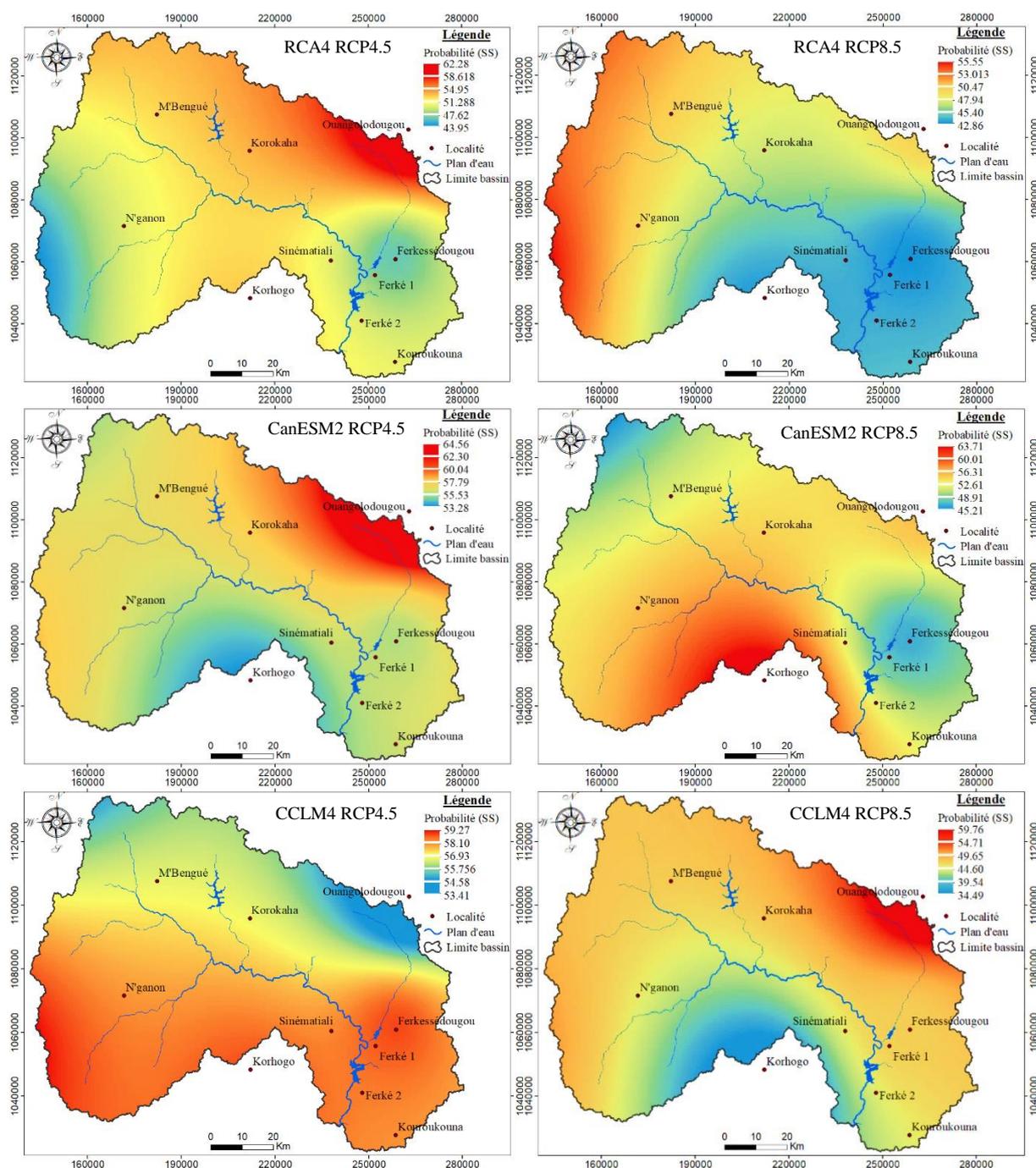


Figure 58 : Répartition spatiale des probabilités d'occurrence de deux années sèches successives selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2021-2050

➤ **Variabilité spatiale de la sécheresse par le processus de Markov 2**

Les modèles climatiques étudiés sont unanimes sur l'intensification de la sécheresse de trois années successives sèches avec des probabilités allant de 47,62% à 83,33% (Figure 59). De plus, les modèles RCA4 et CanESM2 (scénario RCP8.5) indiquent que la zone des complexes sucriers FERKE 1 et FERKE 2 sont sévèrement touchées par cette sécheresse (avec des probabilités supérieures à 70%).

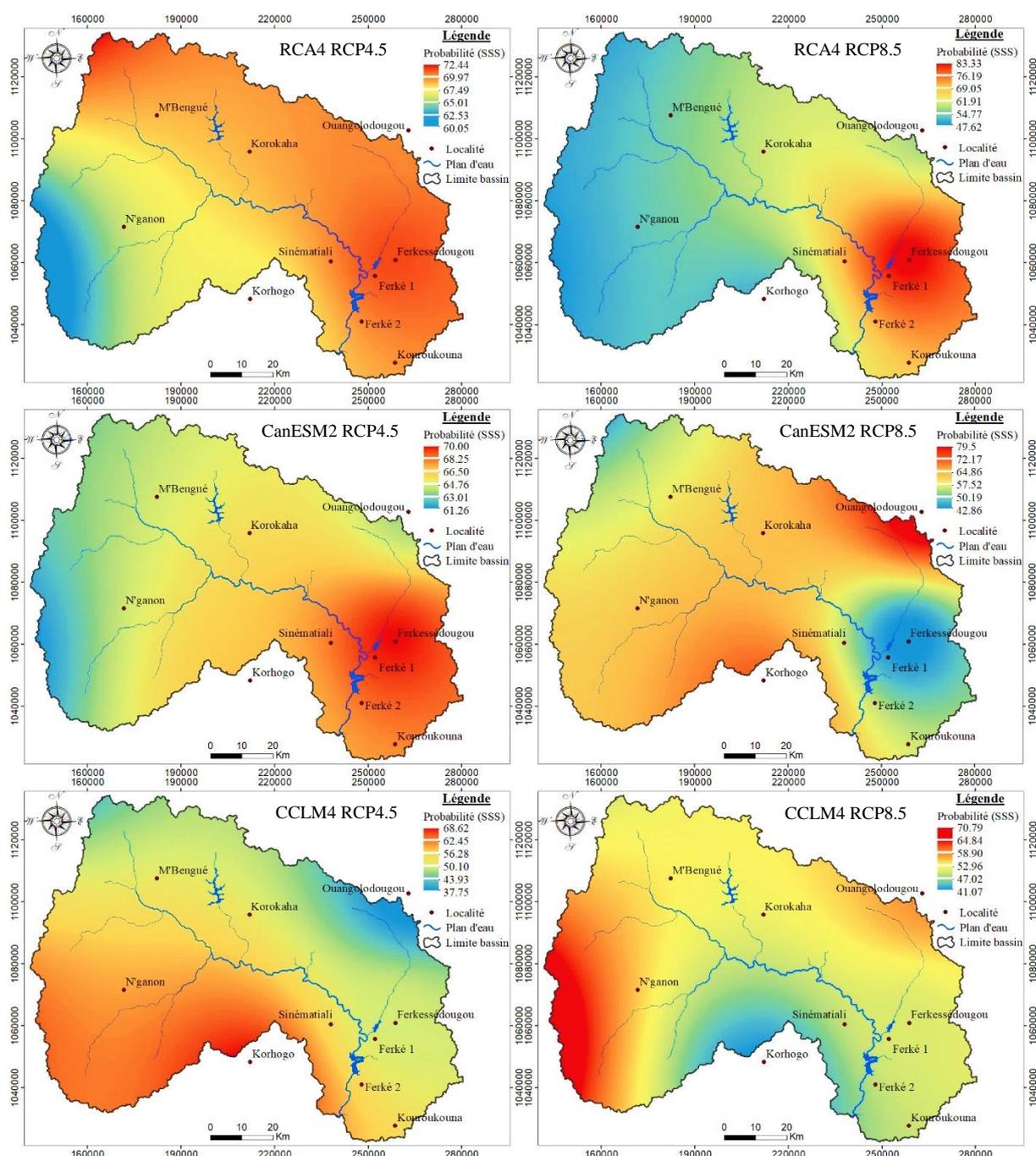


Figure 59 : Répartition spatiale des probabilités d'occurrence de trois années sèches successives selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2021-2050

5.4.2.4. Période de retour de la sécheresse

La figure 60 montre l'évolution des périodes de retour en fonction de la longueur de sécheresse selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 des modèles RCA4, CanESM2 et CCLM4. Selon les MCR, et d'après le scénario RCP4.5, les sécheresses de durée inférieure à 5 ans seront assez récurrentes sur la période 2021-2050 par rapport à celles de 1986-2016 sur l'ensemble du bassin versant (avec des périodes de retour inférieures 5 ans). Cependant, le scénario RCP8.5 estime

le retour des sécheresses de durée inférieure 5 ans moins récurrentes que ceux de la période 1986-2016 (avec des périodes de retour supérieures à 100 ans). Particulièrement à Korhogo, le modèle CanESM2 montre que les sécheresses sont moins récurrentes par rapport aux autres stations.

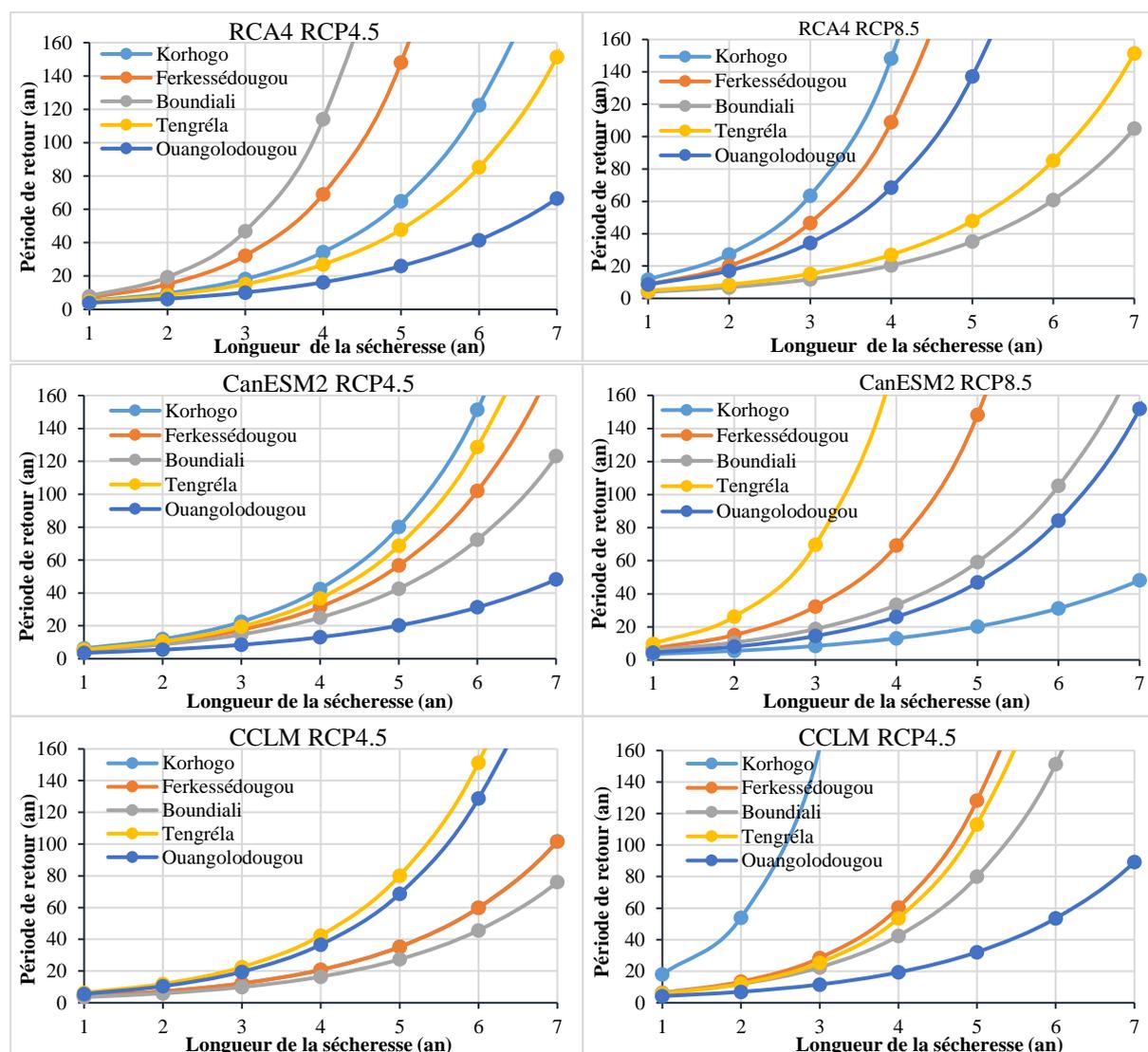


Figure 60 : Période de retour des sècheresses selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 sur la période 2021-2050

5.4.3. Détermination de la saison agricole de la canne à sucre dans les complexes sucriers de Ferkessédougou sur la période 2021-2050

La figure 61 et la figure 62 montrent les saisons agricoles à travers l'évolution décennale de la pluviosité et de l'ETP dans le complexe sucrier de Ferkessédougou sur la période 2021-2050 selon les modèles RCA4, CanESM2 et CCLM4 respectivement.

Dans le complexe sucrier de Ferkessédougou, le modèle RCA4 indique que, comparativement à la période 1986-2016, la période pré-humide correspondant à la phase de semi des boutures

de canne à sucre (A_2B_1) est plus étendue. La période humide (B_1B_2) correspondant à la phase de croissance de la canne à sucre s'étend sur 9 décennies sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Figure 61).

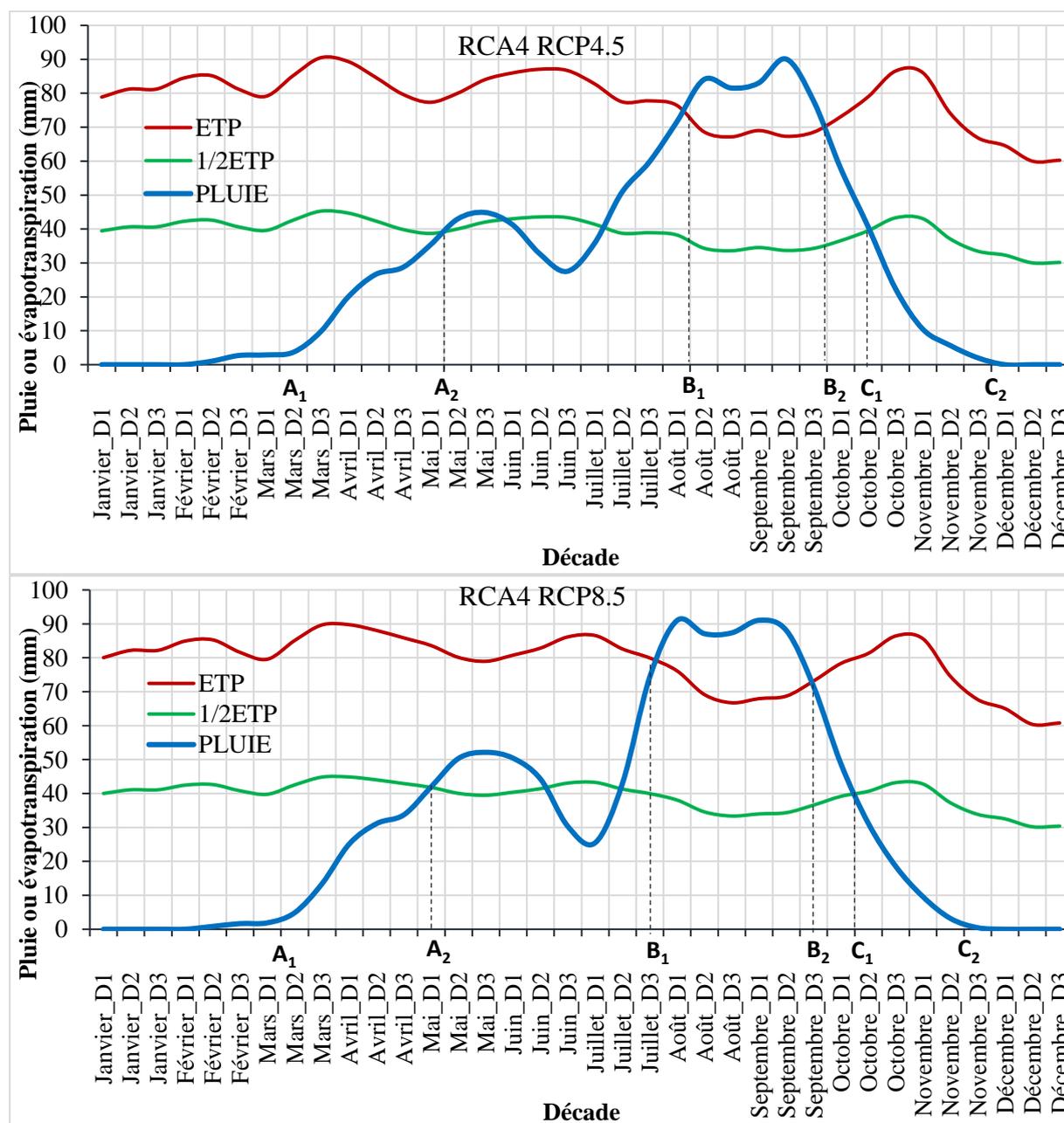


Figure 61 : Identification de la saison agricole dans le complexe sucrier de Ferkessédougou sur la période 2021-2050 selon le modèle RCA4

Le modèle CanESM2 montre également que la période pré-humide correspondant à la phase de semi des boutures de canne à sucre (A_2B_1) est plus étendue tandis que la période humide (B_1B_2) correspondant à la phase de croissance de la canne à sucre est réduite sur la période 2021-2050 par rapport à la période 1986-2016. En effet, sur la période 2021-2050, la phase de semi de la

canne à sucre peut s'inscrire entre la 1^{ère} décade de Juin à la fin de la 1^{ère} décade de Juillet et la phase de croissance de la canne à sucre peut débuter de la 2^{ème} décade de Juillet à la moitié de la 3^{ème} décade de Septembre selon le scénario RCP4.5. Selon le scénario RCP8.5, la phase de semi de la canne à sucre tiendrait uniquement dans la 3^{ème} décade de Juin et la phase de croissance de la canne à sucre peut s'inscrire entre la 1^{ère} décade de Juillet et la 1^{ère} décade de Septembre incluses (Figure 62).

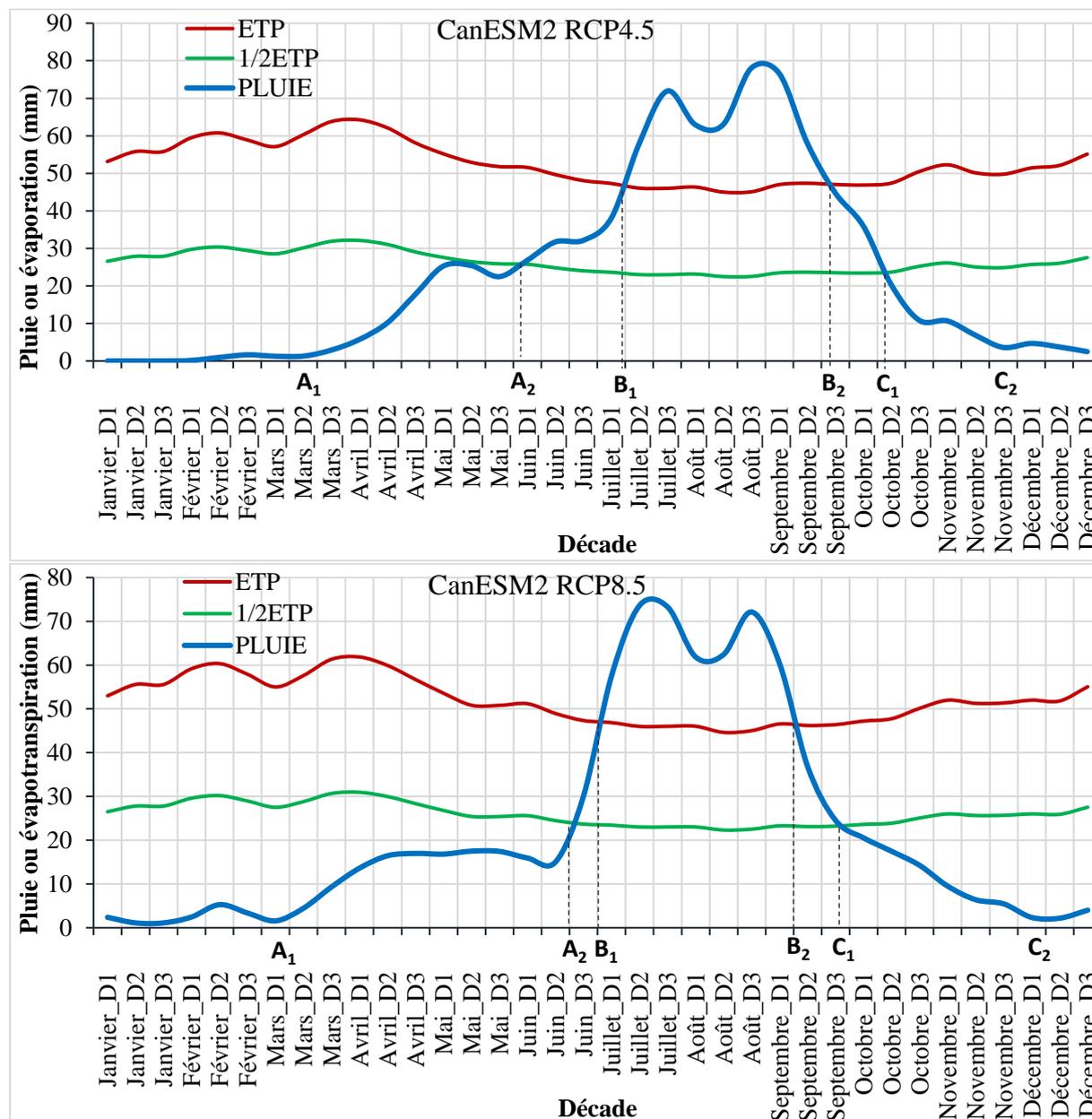


Figure 62 : Identification de la saison agricole dans le complexe sucrier de Ferkessédougou sur la période 2021-2050 selon le modèle CanESM2

En ce qui concerne le modèle CCLM4 (Figure 63), les hauteurs de précipitations maximales s'observent à partir des mois de septembre pour le scénario RCP4.5 et d'Octobre pour le

scénario RCP8.5 (respectivement avec 67,30 et 63,48 mm à la 2^{ème} décennie) tandis que leur niveau le plus bas est enregistré sur la période C₂A₁ pour les deux scénarios. Comparativement à la période 1986-2016, la période pré-humide correspondant à la phase de semi des boutures de canne à sucre (A₂B₁) est plus étendue tandis que la période humide (B₁B₂) correspondant à la phase de croissance de la canne est réduite sur la période 2021-2050 correspondant à 6 décennies selon les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

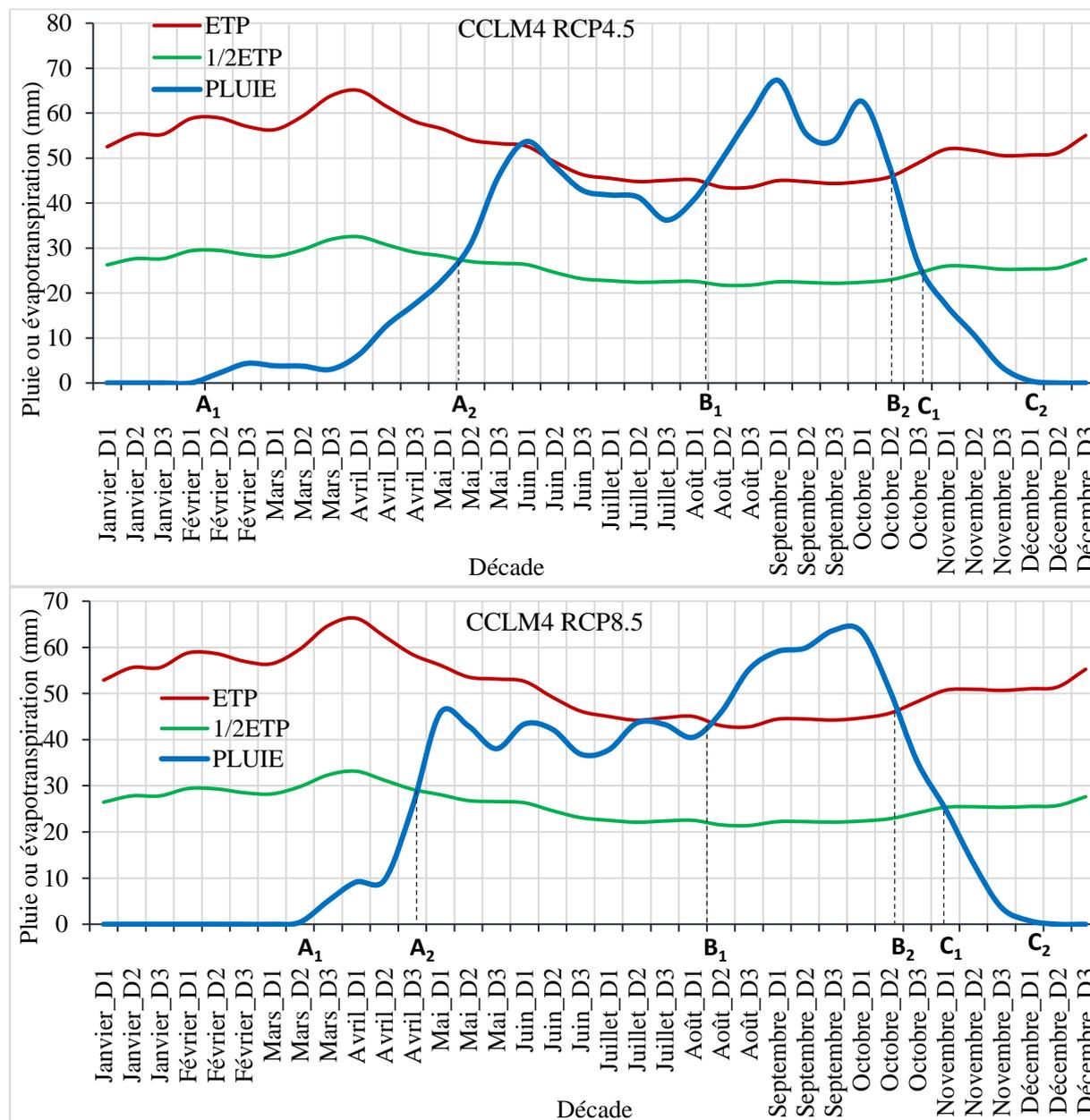


Figure 63 : Identification de la saison agricole dans le complexe sucrier de Ferkessédougou sur la période 2021-2050 selon le modèle CCLM4

5.5. Discussion

Les résultats des indices standardisés de précipitations (SPI) du bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha (BVHBKB) ont montré une alternance d'années sèches et humides avec une forte tendance à la sécheresse sur la période 1986-2016. La tendance des SPI montre une baisse générale des précipitations sur l'ensemble des stations exceptée la zone de Ferkessédougou. En effet, la manifestation du déficit pluviométrique à partir de l'année 1970, qui persiste encore au cours des décennies 1980-1990 et 1990-2000 (Mélèdje *et al.*, 2015 ; Soro *et al.*, 2014), continue d'avoir des répercussions jusqu'à aujourd'hui sur l'ensemble du pays. Cependant, la station de Ferkessédougou a connu une reprise de la pluviométrie à partir de l'année l'année 2000. Cela pourrait être dû à la présence des étendues de cultures de canne à sucre (plus de 17 000 ha) car elle est semblable au bambou, plus réfléchissante, capte le dioxyde de carbone de l'atmosphère et émet davantage d'eau par transpiration tout comme la végétation naturelle (Cerri, 2004). La canne à sucre est classée parmi les plantes de type C4 caractérisées par leur efficacité accrue dans l'absorption du dioxyde de carbone (CO₂). Contrairement aux plantes de type C3, les plantes C4 utilisent une voie de fixation du carbone en quatre étapes, ce qui leur permet de réduire la photorespiration et d'augmenter leur rendement photosynthétique, surtout dans des conditions de forte lumière, de chaleur et de sécheresse (Edwards & Smith., 2010). Sur une période d'un an, un demi-hectare de canne à sucre a la capacité d'absorber plus de 30 tonnes de CO₂ tout en produisant 21 tonnes d'oxygène (O₂) (Cerri, 2004). Majoritairement, le BVHBKB est dominé par des sécheresses de types modérées (d'intensité variant entre -1 à -1,49) et intense (d'intensité variant entre -1,50 à -1,99). L'étude de la relation entre les indices pluviométriques (SPI) et hydrologiques (SDI) révèle une bonne corrélation entre les deux indices avec un coefficient de corrélation de 0,56. Ce qui montre que la sécheresse météorologique a entraîné une baisse des débits sur toute la période 1986-2016.

En ce qui concerne l'occurrence des sécheresses sur la période 2021-2050, les chaînes de Markov ont montré une forte influence des événements précédents sur ceux à venir. Sur la période 1986-2016, l'étude de la succession des années sèches et humides à travers les chaînes de Markov montre que, si l'année précédente est sèche ou humide la probabilité que l'année suivante le soit également est élevée selon la chaîne de Markov d'ordre 1. Aussi, si l'on obtient deux années successives sèches ou humides, la probabilité pour qu'elles soient suivies d'une année sèche ou humide est faible selon la chaîne de Markov d'ordre 2. C'est ce que rapporte Lazri *et al.* (2007) lorsqu'ils affirment que si un état est non précipitant, la probabilité pour qu'il soit suivi d'un état précipitant est plus faible. Or une étude préliminaire conduite dans les complexes sucriers de Ferké 2 et Zuénoula sur deux campagnes agricoles a montré que les

rendements de la canne à sucre variaient en fonction de la pluie reçue par chaque parcelle, notamment au cours de la période critique (période d'exigence en eau) qui va de mars à juillet (Péné & Tuo, 1996 a et b ; Péné *et al.*, 1997). En effet, la relation entre les indices climatiques extrêmes et le rendement de la canne à sucre pluviale montre des coefficients de détermination allant de 46 à 67 %. Ces coefficients sont particulièrement significatifs dans les modèles à deux variables impliquant les indices DTR et CDD ou R20 et CDD. En comparaison avec les autres indices, l'indice des jours de pluie très intenses (R20 mm) explique à lui seul 50 % de la variation du rendement de la canne à sucre pluviale. Cette étude révèle une corrélation négative entre l'indice des jours de pluies très intenses et le rendement de la canne pluviale. Cela traduit que l'augmentation de R20 mm entraîne une baisse du rendement de la canne à sucre pluviale. En réalité, pendant la phase de pré-croissance des quantités de pluies trop élevées peuvent entraver le développement de la plante lorsque le drainage est inefficace. Selon Lisson *et al.* (2005), l'insuffisance d'eau est extrêmement préjudiciable, surtout pendant les périodes de croissance des plantes, mais qu'elle favorise toutefois l'accumulation de saccharose dans la canne à sucre. Ils notent qu'il est recommandé d'apporter régulièrement de l'eau pendant la phase de tallage de la canne, tandis qu'un apport d'eau modéré est préconisé pendant la prématuration. L'effet de la température sur les rendements est également mis en évidence dans les travaux de Pagani *et al.* (2017). Bien que l'augmentation de la température soit généralement vue comme bénéfique pour la canne à sucre pluviale, Deressa *et al.* (2005) et Hunsigi (2012) suggèrent que cette relation est quadratique en raison des effets négatifs potentiels des températures dépassant 35°C sur la croissance de la canne à sucre pluviale.

Les modèles climatiques étudiés indiquent une réduction du nombre d'années successives humides sur la période 2021-2050 tandis que les années successives sèches se feront de plus en plus ressentir. Au début de la période 2021-2050 précisément à partir de 2024, les SPI montrent que les années successives sèches apparaîtront dans l'ensemble du BVHBKB avec des probabilités supérieures à 62 % et 75 % respectivement pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Cela montre que la période 2021-2050 sera plus chaude que la période 1986-2016. C'est le même constat fait par Mélédje *et al.*, (2015) dans le bassin versant de la Bia où la période 1971-2009 qui a suivi la période 1946-1970 a été plus sèche que la précédente sur tout le bassin versant de la Bia. Les périodes de retour des séquences de sécheresse sur la période 1986-2016 s'amenuisent sur la période 2021-2050. Cela annonce des séquences de sécheresse de plus en plus fréquentes sur la période 2021-2050. De plus, les modèles RCA4, CanESM2 et CCLM4 montrent que la période pré-humide correspondant à la phase de semi des boutures de canne à sucre (A₂B₁) est plus étendue tandis que la période humide (B₁B₂) correspondant à la phase de

croissance de la canne à sucre est réduite sur la période 2021-2050 par rapport à la période 1986-2016. Cela réduit la période de croissance de la canne sucre qui dure 5 à 6 mois. Ainsi, sur la période 2021-2050, les modèles prédisent une maturation précoce des cannes à sucre. Au cours de cette phase, la plante subit des contraintes liées à l'eau et/ou à la chaleur, ce qui conduit à l'accumulation de sucre dans les tiges au détriment de la production de biomasse fibreuse (Morel, 2014). Cette situation mettra en mal la culture de canne à sucre car pour obtenir un développement satisfaisant, en plus de la chaleur et la lumière, la culture de canne à sucre a besoin d'eau (Yates, 1998).

Conclusion partielle

L'analyse de l'évolution des indices de changement climatique avec le rendement de la production de la canne à sucre pluviale a montré une étroite corrélation entre ces différentes entités montrant ainsi un réel impact des changements climatiques sur la production de la canne à sucre. Cette évolution du climat sur la période 1986-2016 est plus accentuée sur la période 2021-2050 avec des SPI montrant des séquences de sécheresse beaucoup plus resserrées. Sur la période 2021-2050, les modèles climatiques régionaux indiquent une augmentation des températures et une réduction des pluies dans l'ensemble, excepté le modèle RCA4 qui indique une augmentation de la pluviométrie. La superposition de l'ETP et de la pluviosité dans le même graphique montre que sur la période 1986-2016, les périodes de semis débutaient de la 2^{ème} décennie d'Avril à la 2^{ème} décennie de Mai. Cependant, sur la période 2021-2050, la période de semi des cultures est plus étendue tandis que la période de croissance ou reproductive s'amenuise.

Bien que la méthode de correction des biais utilisée dans cette étude soit robuste, il convient d'utiliser les résultats issus de cette analyse avec réserve car l'élimination des biais n'est pas à 100 % comme l'indique les écarts entre les pics des courbes de pluies simulées corrigées et observées.

Aux vues de la dynamique climatique observées dans cette étude, on se pose la question de savoir quel serait l'impact de ce changement climatique sur la ressource en eau dans le bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha sur la période 2021-2050 ? Le changement climatique serait-il la seule cause de la fluctuation des ressources en eau ? Une analyse de l'impact de la dynamique de l'occupation des sols sur le coefficient de ruissellement dans le bassin versant du Haut Bandama pourrait éclairer cette dernière préoccupation.

CHAPITRE 6 : DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS SUR LA PÉRIODE 2021-2050

6.1. Validation des résultats de la classification de l'utilisation des sols

Le tableau XXVII expose la matrice de confusion employée pour évaluer la classification de l'occupation des sols de 1990. Selon cette matrice, sur un total de 1 197 pixels évalués dans l'image classifiée, 1 148 correspondent à ceux de l'image de référence, entraînant ainsi une précision globale d'environ 95,9 %. Ainsi, lors de cette classification, 49 pixels ont été confondus. Les pixels correctement classés correspondent au nombre de pixels situés sur la diagonale de la matrice de confusion. Il est également observé que les précisions individuelles varient entre 77,63 % et 100 %. À titre d'exemple, 143 pixels de la catégorie de Lambeau de forêt ont été considérés, dont 132 pixels bien classifiés et des confusions sur 11 pixels, soit environ 95,90%. Le tableau XXVII souligne également que la précision de la classification des zones de cultures ou jachères est la plus basse, atteignant 77,63 %. Dans l'ensemble, les précisions répertoriées dans ce tableau suggèrent que le résultat de la classification de 1990 est satisfaisant.

Tableau XXVII : Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 1990

1990		Données de référence					Total	Précision (%)	
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide			Plan d'eau
Données classifiées	Lambeau de forêt	132	0	1	0	10	0	143	92,3
	Savane	0	175	0	4	1	4	184	95,11
	Culture ou jachère	17	0	59	0	0	0	76	77,63
	Bâti ou sol nu	0	0	0	119	0	0	119	100
	Zone humide	0	0	0	0	216	11	227	95,15
	Plan d'eau	0	0	0	0	11	447	458	97,59
	Total	149	175	60	123	228	462	1 197	

En ce qui concerne la classification de l'occupation des sols de 2006, 1 484 pixels ont été testé pour déterminer sa précision (Tableau XXVIII). Ce tableau montre que 1 471 pixels sont bien classifiés, soit une précision globale de 99,12 % et la précision par catégorie est comprise entre 95,16 % et 100 %. Ainsi, il y a une confusion sur 13 pixels lors cette classification. Les pixels bien classifiés correspondent au nombre de pixels sur la diagonale de la matrice de confusion. Il montre également que la précision de la classification des zones de savane, culture ou jachère et de bâti ou sol nu est assez élevée (égale à 100 %), tandis que celle des zones humides est la plus faible (95,16 %).

L'évaluation de la précision de la classification de l'occupation des sols de 2020, une matrice de confusion et la précision individuelle des catégories d'occupation des sols a été calculée

(Tableau XXIX). Dans ce tableau, 1 484 pixels classifiés sont comparés avec ceux de l'image de référence. Parmi eux, 1 466 pixels (somme de la diagonale), soit environ 97,95 % des pixels sont en bon accord. Le tableau XXVIII montre que la précision de chaque catégorie est élevée et se situe dans une gamme de 92,97 % à 100 %.

Tableau XXVIII : Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 2006

2006		Données de référence					Total	Précision (%)	
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide			Plan d'eau
Données classifiées	Lambeau de forêt	227	0	0	0	0	3	230	98,6
	Savane	0	244	0	0	0	0	244	100
	Culture ou jachère	0	0	213	0	0	0	213	100
	Bâti ou sol nu	0	0	0	286	0	0	286	100
	Zone humide	0	0	0	0	177	9	186	95,16
	Plan d'eau	0	0	0	0	1	324	325	99,69
	Total	227	244	213	286	178	336	1 484	

Tableau XXIX : Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 2020

2020		Données de référence					Total	Précision (%)	
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nue	Zone humide			Plan d'eau
Données classifiées	Lambeau de forêt	303	0	0	0	0	1	304	99,67
	Savane	2	225	0	14	0	1	242	92,97
	Culture ou jachère	0	0	263	0	0	0	263	100
	Bâti ou sol nu	0	0	0	329	0	1	330	99,69
	Zone humide	0	0	0	2	97	3	102	95,09
	Plan d'eau	0	0	0	0	6	219	225	97,33
	Total	305	225	263	345	103	225	1 466	

De façon générale, le tableau XXX présente les précisions globales et les coefficients de Kappa obtenus à partir des résultats d'analyse des matrices de confusion. Les précisions globales pour les cartes de 1990, 2006 et 2020 sont supérieures à la valeur recommandée (85%). Les coefficients de Kappa sont, eux aussi, supérieurs à la valeur recommandée qui est de 0,80. Ils sont dans une gamme de 0,95 à 0,98. Les précisions obtenues permettent de dresser les cartes de l'occupation des sols de 1990, 2006, (Figure 64A et figure 64B) et 2020 (Figure 65).

Tableau XXX : Précision globale des cartes de l'occupation des sols

Occupation des sols	1990	2006	2020
Précision globale (%)	95,90	99,12	97,95
Coefficient de Kappa	0,95	0,99	0,98

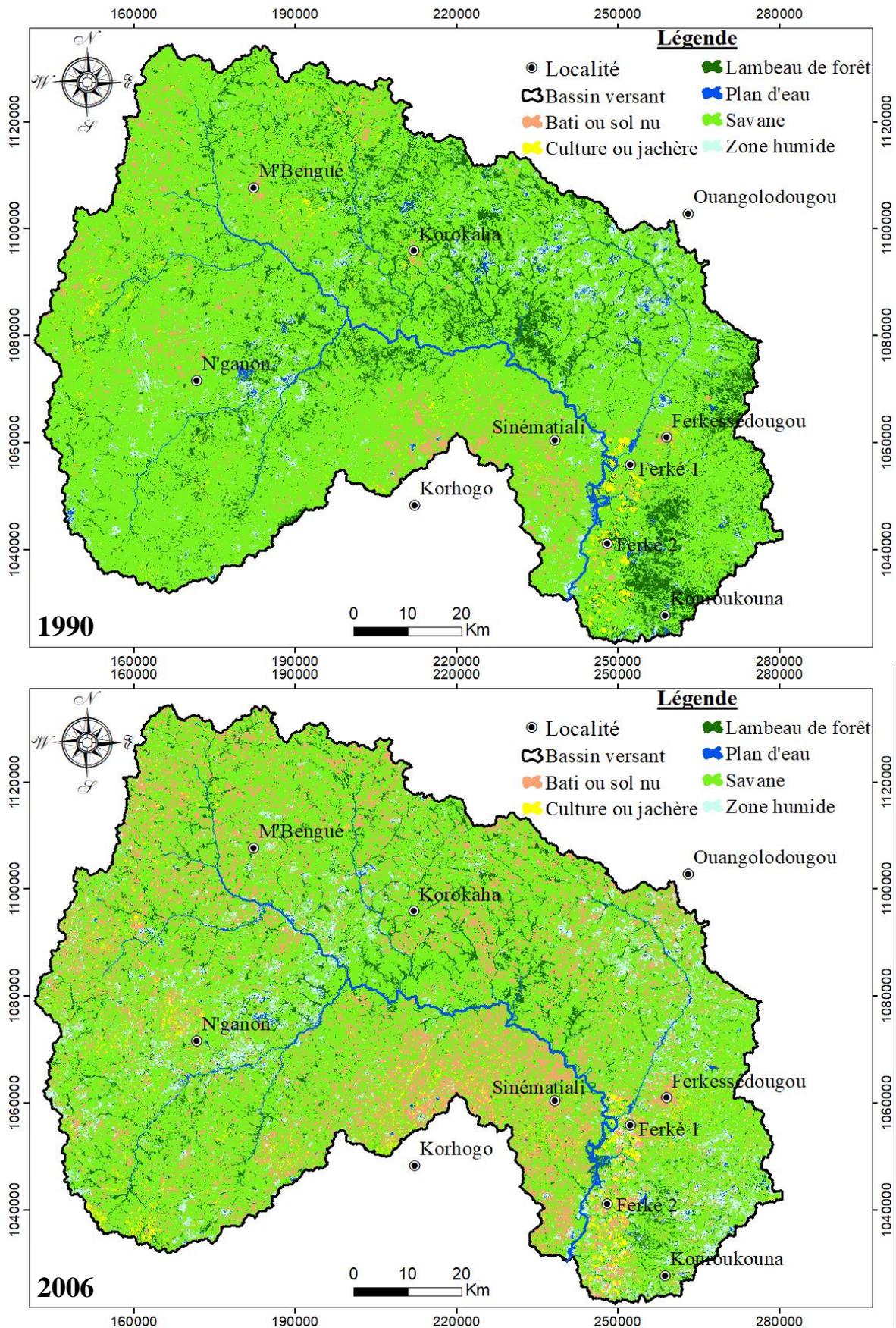


Figure 64 : Cartes de l'occupation des sols de 1990 et de 2006

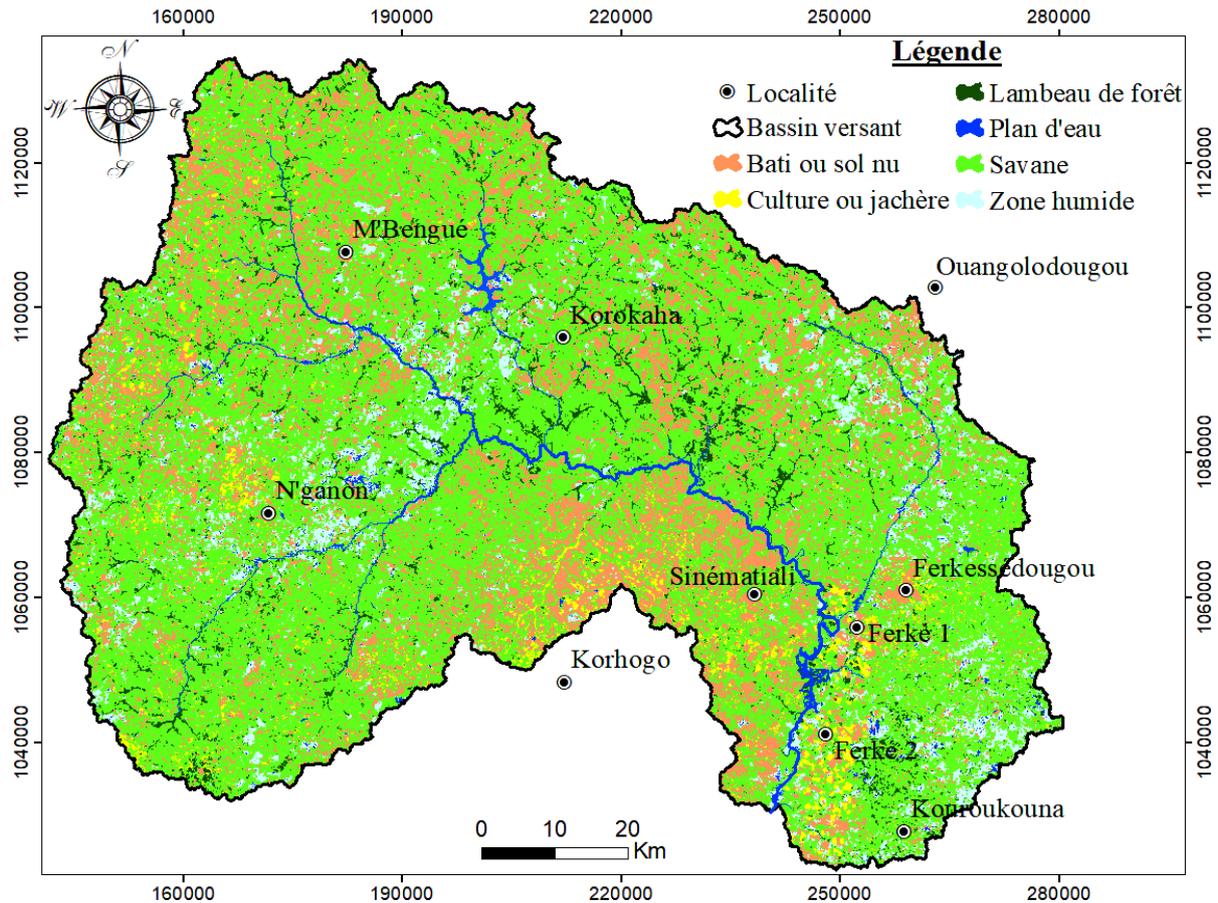


Figure 65 : Carte de l'occupation des sols en 2020

6.2. Analyse de la dynamique de l'occupation des sols

Pour mieux appréhender l'évolution et la modélisation de l'occupation des sols future, une analyse des dynamiques récentes est cruciale. Dans cette partie, l'analyse diachronique de l'occupation des sols est utilisée pour l'évaluation quantitative de cette dynamique de l'occupation des sols de 1990 à 2020.

6.2.1. Analyse diachronique de l'évolution de l'occupation des sols

6.2.1.1. Evolution de l'occupation des sols sur la période 1990-2006

Les valeurs des pourcentages de changement entre 1990 et 2006 (Tableau XXXI) révèlent une notable expansion des classes telles que la culture ou la jachère, les zones humides et les zones bâties ou nues, avec des augmentations respectives de leur superficie initiale de 30,44 %, 83,10 % et 400,03 %. Cela se traduit par des gains de plus de 47 km², 281 km² et 1 662 km² respectivement pour ces catégories. Le tableau XXXI montre également que les autres changements sont relativement importants tels que la diminution des surfaces des lambeaux de forêt (-48,89 %), des savanes (-14,88 %) et des plans d'eau (-4,80 %).

Selon le tableau XXXI, la classe dont la surface reste relativement stable dans le temps, est la classe de plan d'eau. Les autres classes affichent des variations notables. Les cultures ou jachères ainsi que les bâtis ou sols nus ont sensiblement progressé pendant cette période. A l'inverse, on peut voir nettement une forte diminution des surfaces des savanes et lambeaux de forêt. La classe qui s'est relativement bien développée reste les zones de bâtis ou sols nus qui sont concentrées principalement autour des agglomérations. En revanche, la classe lambeau de forêt accuse une nette diminution de 48,89 %.

Tableau XXXI : Changement de l'occupation des sols entre 1990-2006

	Surface en 1990 (km ²)	Surface en 2006 (km ²)	Gain et perte (km ²)	Gain et perte (%)
Lambeau de forêt	1 034,08	528,48	-505,6	-48,89
Savane	7 722,91	6 573,29	-1 149,62	-14,88
Culture ou jachère	155,92	203,38	47,46	30,44
Bâti ou sol nu	332,56	1 662,91	1 330,35	400,03
Zone humide	338,43	619,66	281,23	83,10
Plan d'eau	104,95	99,91	-5,04	-4,80

6.2.1.2. Évolution de l'occupation des sols sur la période 2006-2020

Entre 2006 et 2020, les zones humides et les plans d'eau sont restés relativement stables, comme illustré dans la figure 64. Cependant, selon le tableau XXXII, on observe de légères augmentations dans les zones occupées par les cultures ou les jachères, ainsi que par les bâtiments ou les sols nus, avec des changements respectifs de 34,32 % et de 22,43 %. De plus, l'occupation des sols au cours de cette période montre une diminution dans les catégories des zones humides (-0,57 %), des savanes (-3,65 %), des plans d'eau (-11,66 %), et notamment dans la classe des lambeaux de forêt (-35,5 %).

Tableau XXXII : Changement de l'occupation des sols entre 2006-2020

	Surface en 2006 (km ²)	Surface en 2020 (km ²)	Gain et perte (km ²)	Gain et perte (%)
Lambeau de forêt	528,48	340,85	-187,63	-35,5
Savane	6573,29	6333,31	-239,98	-3,65
Culture ou jachère	203,38	273,19	69,81	34,32
Bâti ou sol nu	1662,91	2035,89	372,98	22,43
Zone humide	619,66	616,14	-3,52	-0,57
Plan d'eau	99,91	88,26	-11,65	-11,66

6.2.2. Bilan de l'évolution de l'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama sur la période 1990-2020

Le tableau XXXIII et la figure 66 résumant respectivement les résultats du calcul des taux de changements et des superficies sur les périodes 1990-2006 et 2006-2020.

On peut observer que dans les deux périodes considérées, la surface des lambeaux de forêt présente une diminution d'environ 48,89 % et de 35,5 % pour chaque période (respectivement 1990-2006 et 2006-2020). Durant ces deux périodes, la classe d'occupation des sols qui a progressé le plus est celle des bâtis ou sols nus, surtout sur la période entre 1990 et 2006 avec un gain de plus de 400 % par rapport à sa superficie initiale.

Tableau XXXIII : Changement de l'occupation des sols de 1990 à 2020

Classes d'occupation des sols	Gain et perte (km ²) 1990-2006	Taux d'évolution (%) 1990-2006	Gain et perte (km ²) 2006-2020	Taux d'évolution (%) 2006-2020
Lambeau de forêt	-505,6	-48,89	-187,63	-35,5
Savane	-1149,62	-14,88	-239,98	-3,65
Culture ou jachère	47,46	30,44	69,81	34,32
Bâti ou sol nu	1330,35	400,03	372,98	22,43
Zone humide	281,23	83,10	-3,52	-0,57
Plan d'eau	-5,04	-4,80	-11,65	-11,66

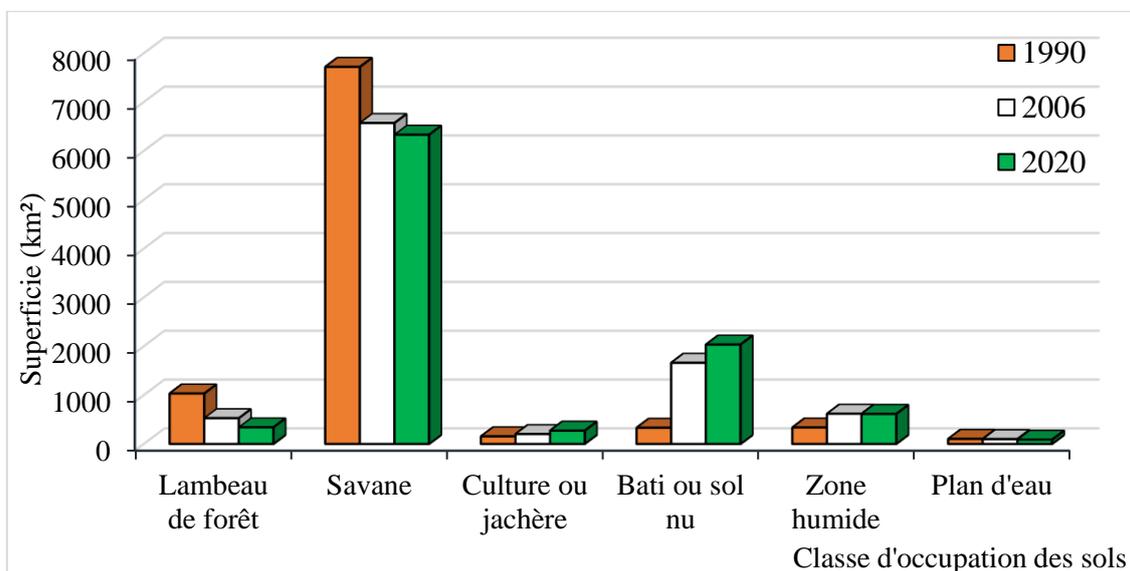


Figure 66 : Évolution des classes d'occupation des sols sur la période 1990-2020

6.3. Prédiction de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama

6.3.1. Analyse du changement de l'occupation des sols

La figure 67a présente les changements nets de l'occupation des sols sur la période 1990 à 2006 du bassin versant du Haut Bandama. Le changement net pour chaque catégorie de l'occupation des sols et leurs contributions sont présentés à la figure 67b. Elles indiquent que la plupart classe d'occupation sols ont des gains et des pertes : les zones de lambeaux de forêt et de savanes ont nettement régressé tandis que les zones de bâtis ou sols nus, de cultures ou jachères et de zones humides ont nettement progressé. La superficie des plans d'eau ne semble pas évoluer. En somme, les zones de lambeaux de forêt ont perdu environ 753 km², mais elles ont gagné aussi environ 248 km² durant la période allant de 1990 à 2006 (Figure 67a). La perte nette de ces zones est donc de 505 km² (Figure 67b).

La savane affiche la plus forte perte en superficie d'environ 2 268 km². A l'inverse elle a gagné près de 1 119 km², soit une perte nette de plus de 1 149 km² (environ 22 %) durant la période de 1990 à 2006. Au cours de cette même période, les zones de bâtis ou sol nu, cultures ou jachères et zones humides ont perdu plus de 205, 135 et 283 km² respectivement. Cependant, elles ont gagné plus de 1 536, 183 et 565 km² respectivement. Parmi ces classes d'occupation de sol, la superficie de bâtis ou sols nus affiche la plus forte augmentation, avec un gain net de 1 331 km².

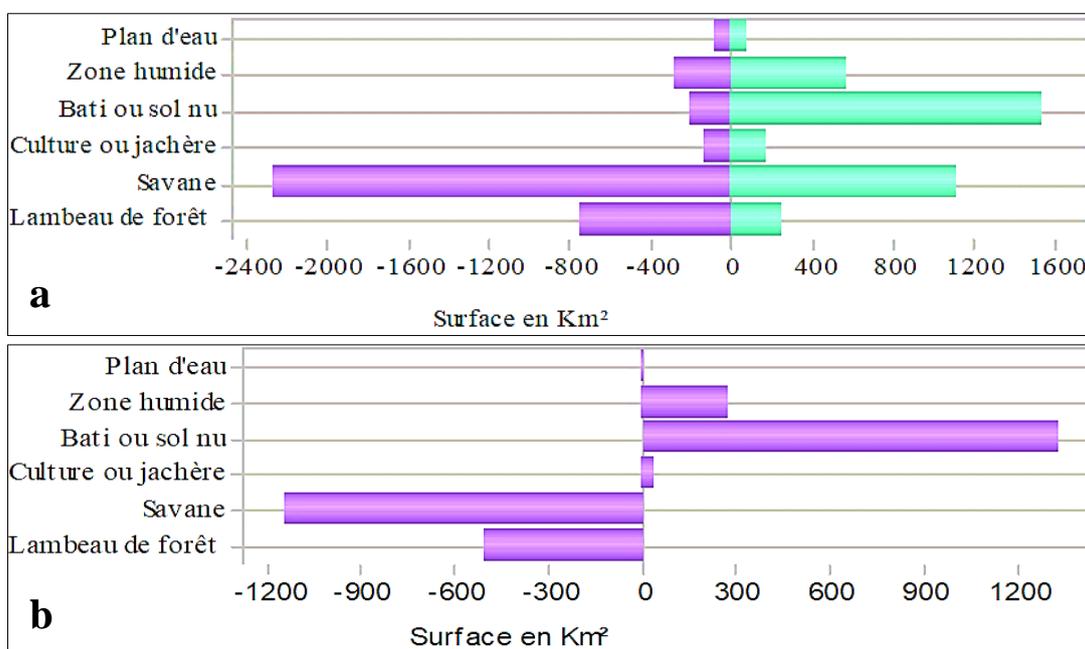


Figure 67 : Gains, pertes et Changement net de l'occupation des sols entre 1990 et 2006
Gains, pertes (a) et Changement net (b)

La figure 68 montre la contribution du changement net des catégories de l'occupation des sols de 1990 à 2006. On constate que la classe savane contribue le plus aux changements nets dans la plupart des catégories d'occupation des sols, suivie par les zones bâties ou les sols nus. Cependant, il existe des transitions potentielles des zones forestières vers les savanes. Des transitions potentielles sont observées dans le bassin versant du Haut Bandama entre les zones bâties ou les sols nus et les savanes, avec une augmentation de la superficie des zones bâties ou des sols nus au détriment des savanes. On remarque également une diminution de la superficie des cultures ou jachères au profit des savanes, tandis que les plans d'eau diminuent au profit des zones bâties ou des sols nus. Dans les zones bâties et les sols nus, on constate une diminution des surfaces au profit des savanes. De même, les zones humides régressent au profit des savanes (Figure 68).

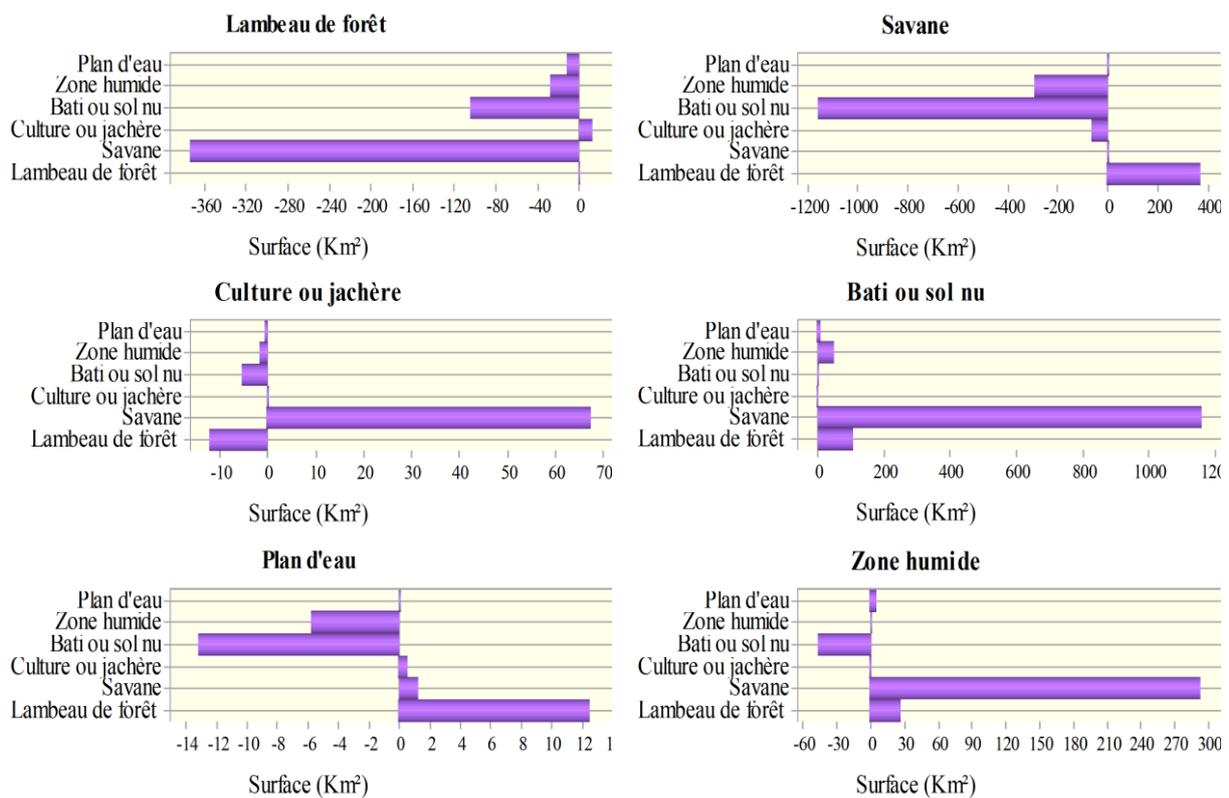


Figure 68 : Changement net des catégories de l'occupation des sols de 1990 à 2006

Les figures 69, 70, 71, 72, 73 et 74 illustrent la cartographie des tendances globales des transitions entre les catégories d'occupation des sols entre 1990 et 2006 pour le bassin versant du Haut Bandama à Badikaha. Les zones en rouge foncé représentent les transitions les plus significatives entre les catégories, tandis que les zones en vert foncé indiquent l'absence de

changement. Ainsi, plus l'indice de transition d'une classe est élevé dans une zone, plus cette zone a une forte probabilité de transit en cette classe.

L'évolutions des bâtis ou sols nus (Figure 69) sont particulièrement marquées dans la partie nord-ouest et ouest du bassin versant, s'étendant vers les localités de M'bengué et N'ganon jusqu'à Sinématiali et Korhogo. On observe également une légère évolution dans la zone du complexe sucrier de Ferkessédougou, avec des indices de transition variant entre 0,014 et 0,044.

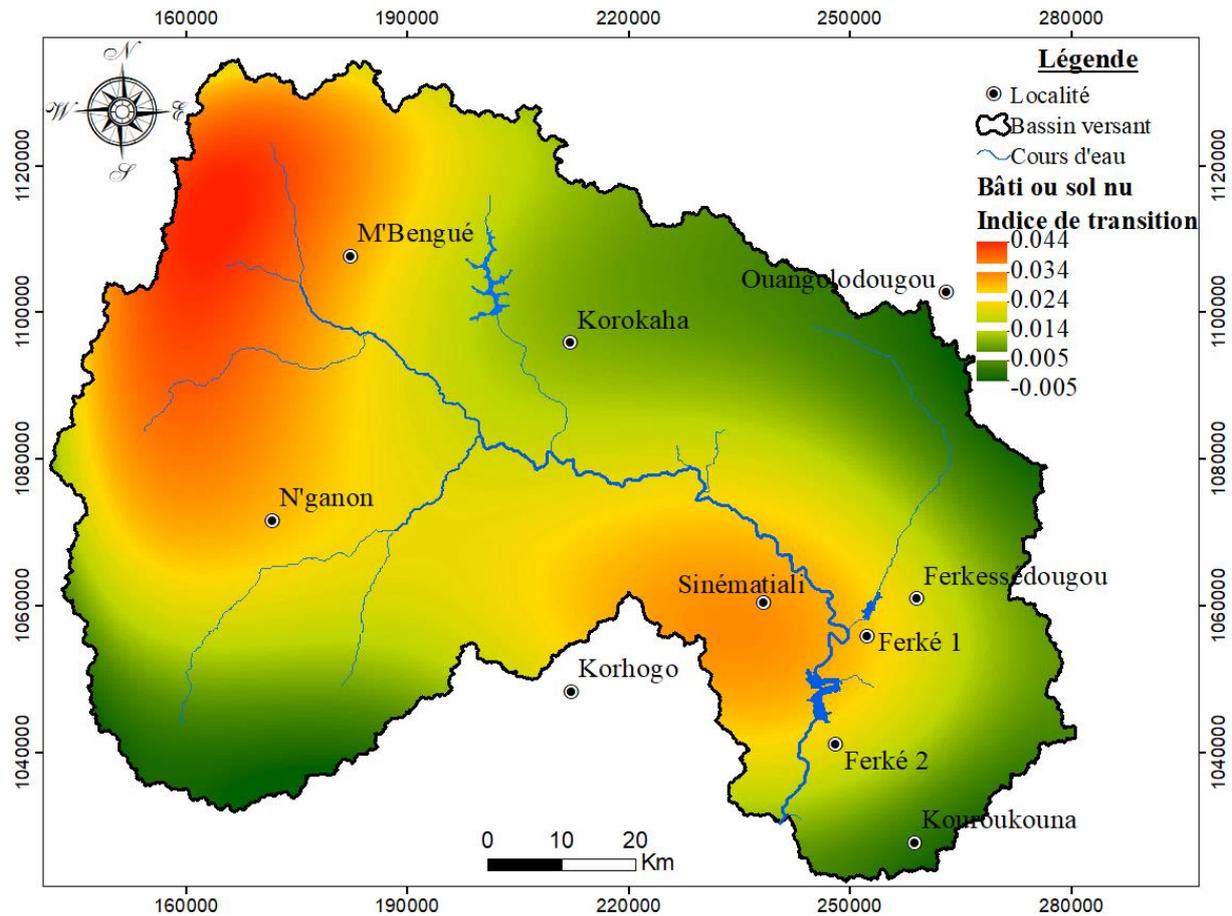


Figure 69 : Carte des tendances de changement global de la classe bâti ou sol nu de 1990 à 2006

Au niveau de la classe culture ou jachère (Figure 70), les transitions ont lieu à l'extrême Ouest et le Nord-Ouest du bassin versant passant par M'bengué avec moins d'intensité. Cependant, au Sud du bassin (à l'Est de Sinématiali et au Sud de la ville de Ferkessédougou) dans la zone des complexes sucriers de Ferké 1 et 2, la tendance générale de transition des cultures ou jachères montre de forts changements avec des indices compris entre 0,017 et 0,030.

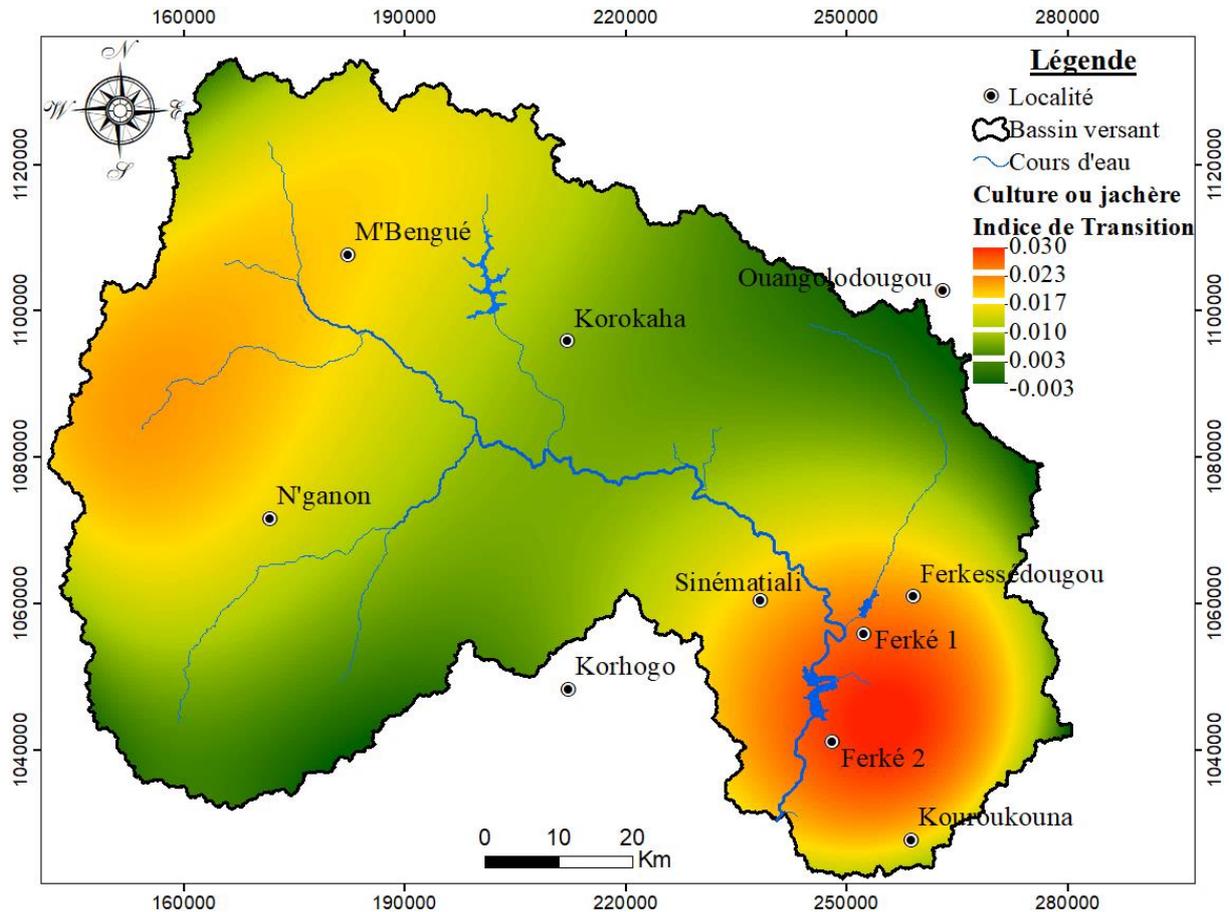


Figure 70 : Carte des tendances de changement global de la classe culture ou jachère de 1990 à 2006

La tendance générale des lambeaux de forêt à lieu dans le Nord, l'Est et le Sud-Est du bassin versant du Haut Bandama (Figure 71). Ces zones présentent de fortes tendances de transition pour la classe de lambeaux de forêt contrairement aux autres classes d'occupation des sols. Les indices de transition des classes des lambeaux de forêt dans la localité de M'Bengué, Korokaha et dans les complexes sucriers de Ferkessédougou sont dans l'ordre de 0,044 à 0,149.

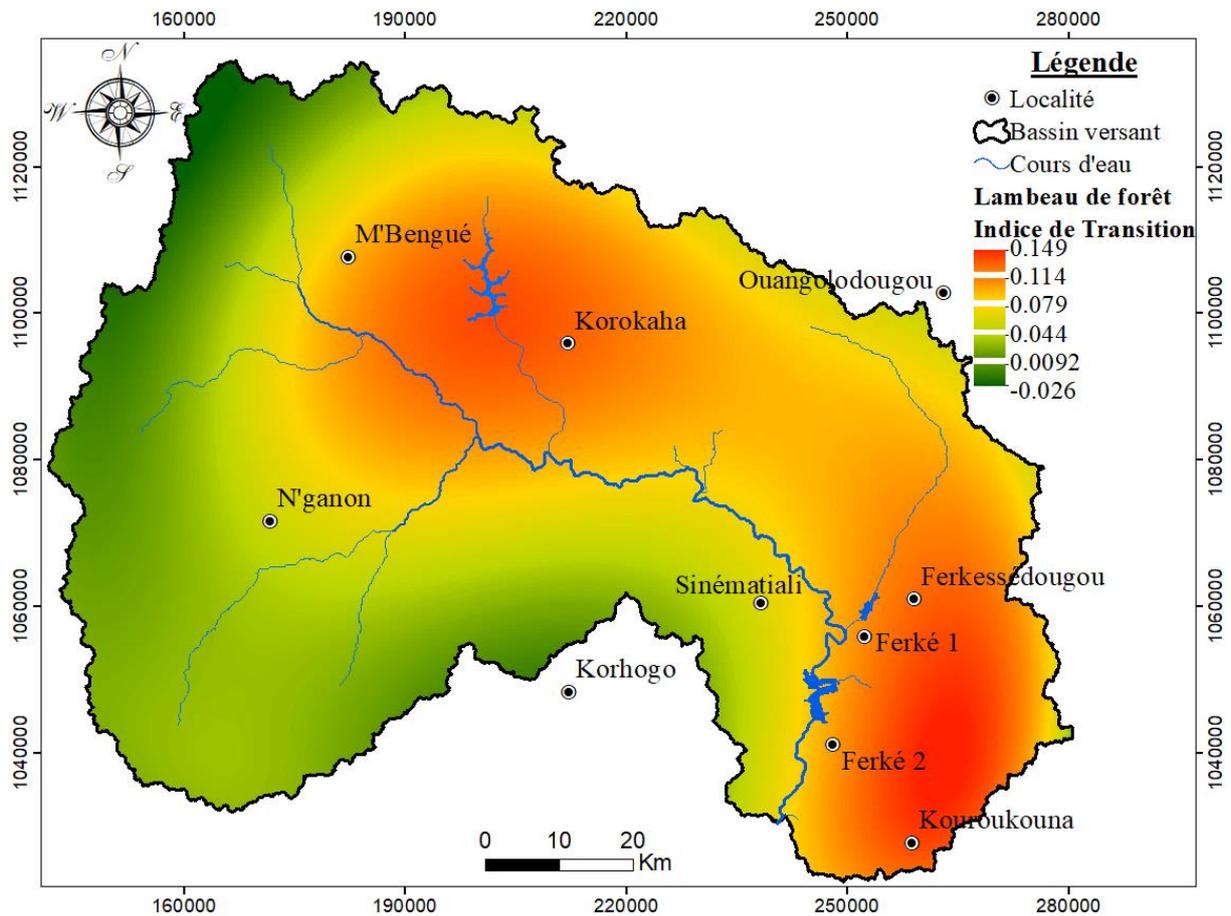


Figure 71 : Carte des tendances de changement global de la classe lambeau de forêt de 1990 à 2006

La figure 72 montre la transition globale de la classe des plans d'eau. Cette transition est élevée au Nord dans les localités de Korokaha et Ouangolodougou. Cependant, elle est moins élevée dans la zone des complexes sucriers Ferké 1 et 2 et dans la localité de Kouroukouna au Sud du bassin versant. Cette transition commence à se faire ressentir également au Sud-Ouest du bassin versant. Les indices dans ces zones de transition varient de 0,003 à 0,021.

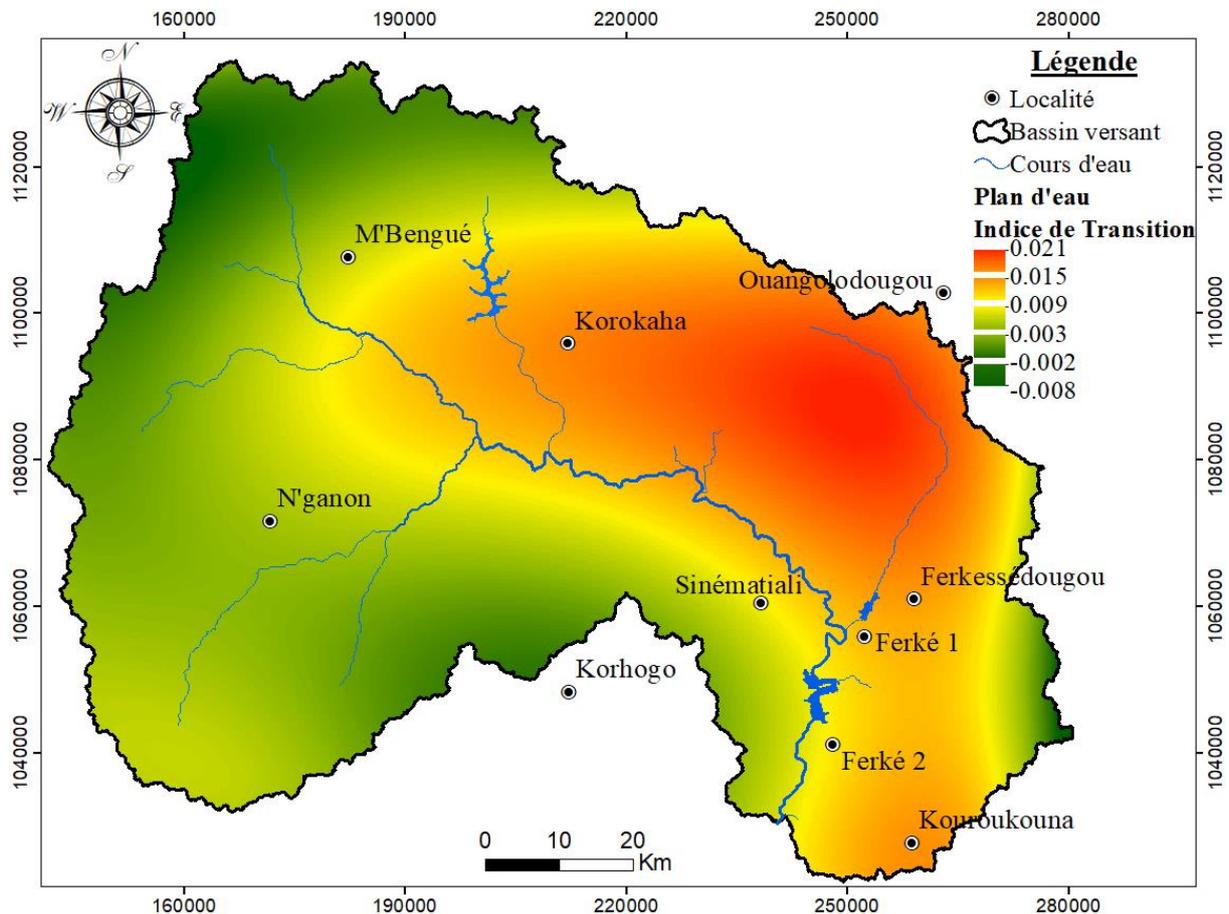


Figure 72 : Carte des tendances de changement global de la classe plan d'eau de 1990 à 2006

Sur la figure 73, les indices de transition des savanes montrent que la plus forte évolution de la classe des savanes se situe à l'Ouest du bassin versant, autour des localités de N'ganon et M'bengué. Cette transition se manifeste également au Sud-Est à partir de Sinématiali, Ferkessédougou et les complexes sucriers de Ferké 1 et 2. Les indices de transition dans ces zones varient de 0,210 à 0,297.

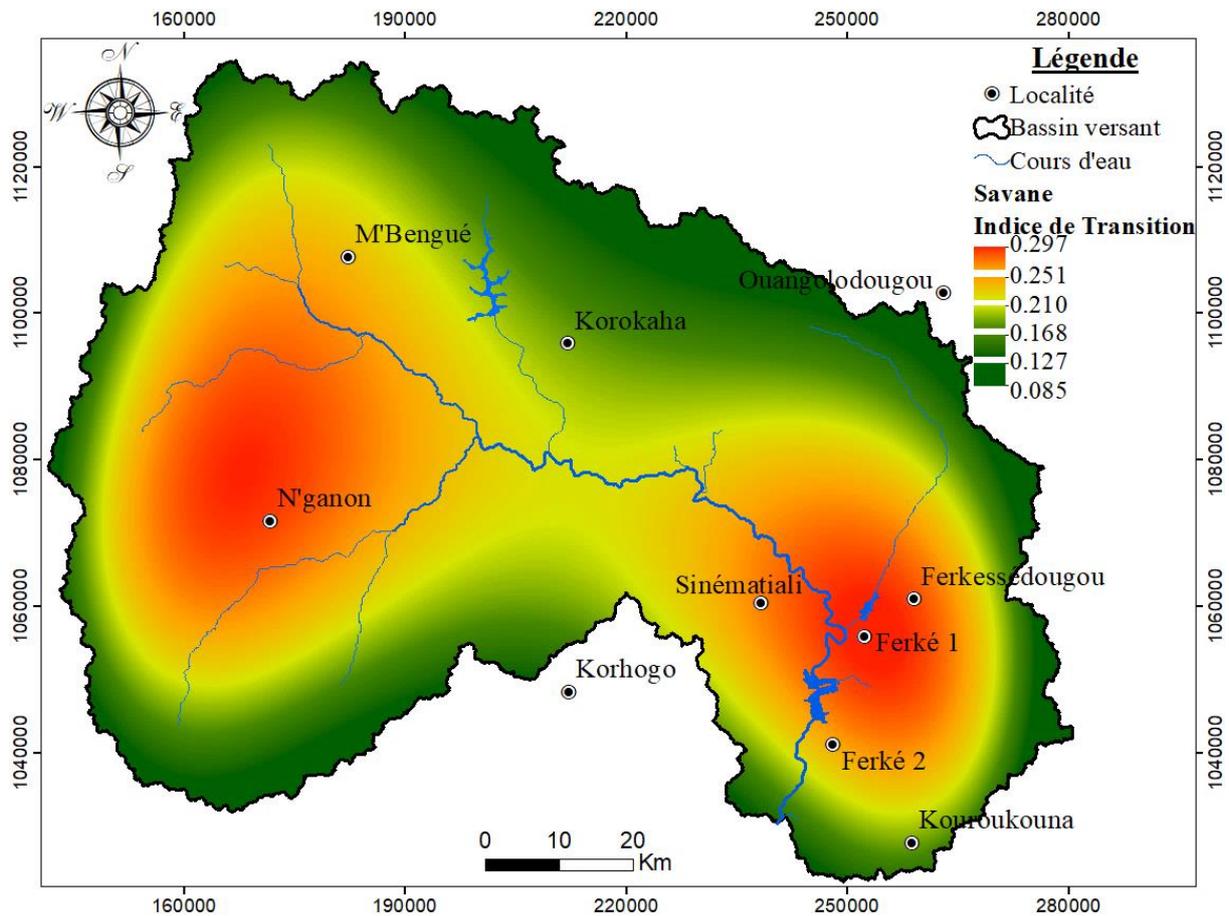


Figure 73 : Carte des tendances de changement global de la classe savanes de 1990 à 2006

La figure 74 révèle que les transitions des zones humides sont significatives au nord du bassin versant, notamment dans les localités de Ouangolodougou et Korokaha, ainsi qu'au centre-ouest, sud-ouest et sud-est du bassin versant, avec des indices de transition variant de 0,010 à 0,059.

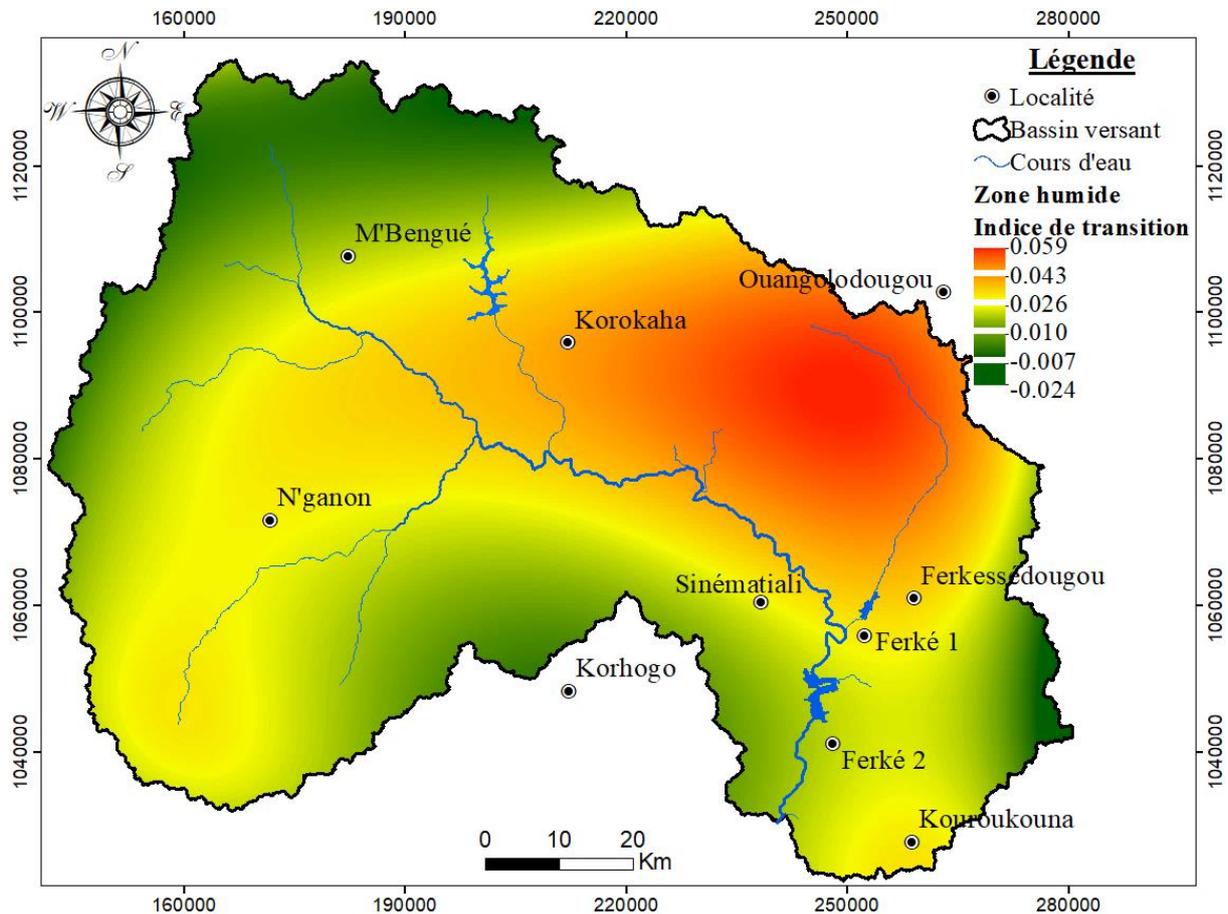


Figure 74 : Carte des tendances de changement global de la classe zone humide de 1990 à 2006

6.3.2. Validation du modèle Land Change Modeler et simulation de l'occupation des sols de 2020

L'élaboration de la carte prédictive de l'occupation des sols à l'horizon 2020 du BVHKB et sa comparaison à la carte de référence pour la même date a permis de valider le modèle LCM. La validation est effectuée par l'évaluation du coefficient de Kappa, de la précision globale de la carte prédictive et de l'évaluation individuelle de la superficie des différentes classes d'occupation des sols (Figure 76). Cette carte sera considérée comme acceptable si la précision globale est au moins égale à 80 %.

Dans cette étude, la chaîne de Markov a été appliquée pour déterminer les potentiels de transition à l'horizon 2020. le résultat est une matrice des probabilités de transition pour la même date (Tableau XXXIV). Dans cette matrice, les colonnes correspondent aux catégories

de l'occupation des sols prévues pour 2020 et les lignes correspondent à celles de 2006. Les valeurs sur la diagonale principale de cette matrice indiquent la stabilité pour chaque catégorie de l'occupation des sols et varient de 0 à 1. Les valeurs proches de 1 montrent une grande stabilité pour les catégories de l'occupation des sols, à l'inverse, celles proches de 0 montrent des changements importants. Ainsi, le tableau XXXIV montre que les changements de l'occupation des sols peuvent arriver à toutes les catégories à l'horizon 2020. Parmi ces catégories, les possibilités de changement pour les lambeaux de forêt, cultures ou jachères, bâtis ou sols nus, zones humides et plans d'eau sont assez élevées (valeurs sur la diagonale principale de la matrice inférieures à 0,5). Par contre les changements pour les savanes sont relativement faibles (valeurs supérieures à 0,6).

Tableau XXXIV : Matrice des probabilités de transition de l'occupation des sols de 2006-2020

		Classe d'occupation des sols (2020)					
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide	Plan d'eau
Classe d'occupation des sols (2006)	Lambeau de forêt	0,3026	0,5576	0,0084	0,0907	0,0235	0,0172
	Savane	0,0275	0,7145	0,0183	0,1666	0,0657	0,0074
	Culture ou jachère	0,1593	0,5144	0,1472	0,1487	0,0236	0,0069
	Bâti ou sol nu	0,0000	0,5050	0,0586	0,4046	0,031	0,0017
	Zone humide	0,0030	0,6271	0,0047	0,1663	0,1773	0,0215
	Plan d'eau	0,0442	0,5322	0,0025	0,1234	0,1275	0,1701

Les résultats de la précision globale indiqués dans le tableau XXXV démontrent que la précision globale de la carte prédictive de l'occupation des sols en 2020 est assez élevée (82,62 %). Ces résultats montrent également que la précision globale et le coefficient Kappa de cette carte (respectivement 82 % et 0,81) dépassent les seuils recommandés de 80 % et 0,80 respectivement. Ces performances rendent le traitement acceptable et le modèle viable pour les prévisions d'occupation des sols à l'horizon 2035 et 2050.

Tableau XXXV : Fiabilité de la carte de l'occupation des sols de 2020

Paramètres	Valeurs
Précision globale (%)	82,62
Coefficient de Kappa	0,81

Sur la base de la matrice des probabilités de transition obtenue, la carte prédictive de l'occupation des sols de 2020 a été simulé (Figure 75). Cette carte contient les mêmes catégories

de l'occupation des sols que les cartes initiales observées (cartes de 1990, 2006 et 2020) à savoir la catégorie des lambeaux de forêt, des savanes, des cultures ou jachères, des bâtis ou sols nus, des zones humides et des plans d'eau.

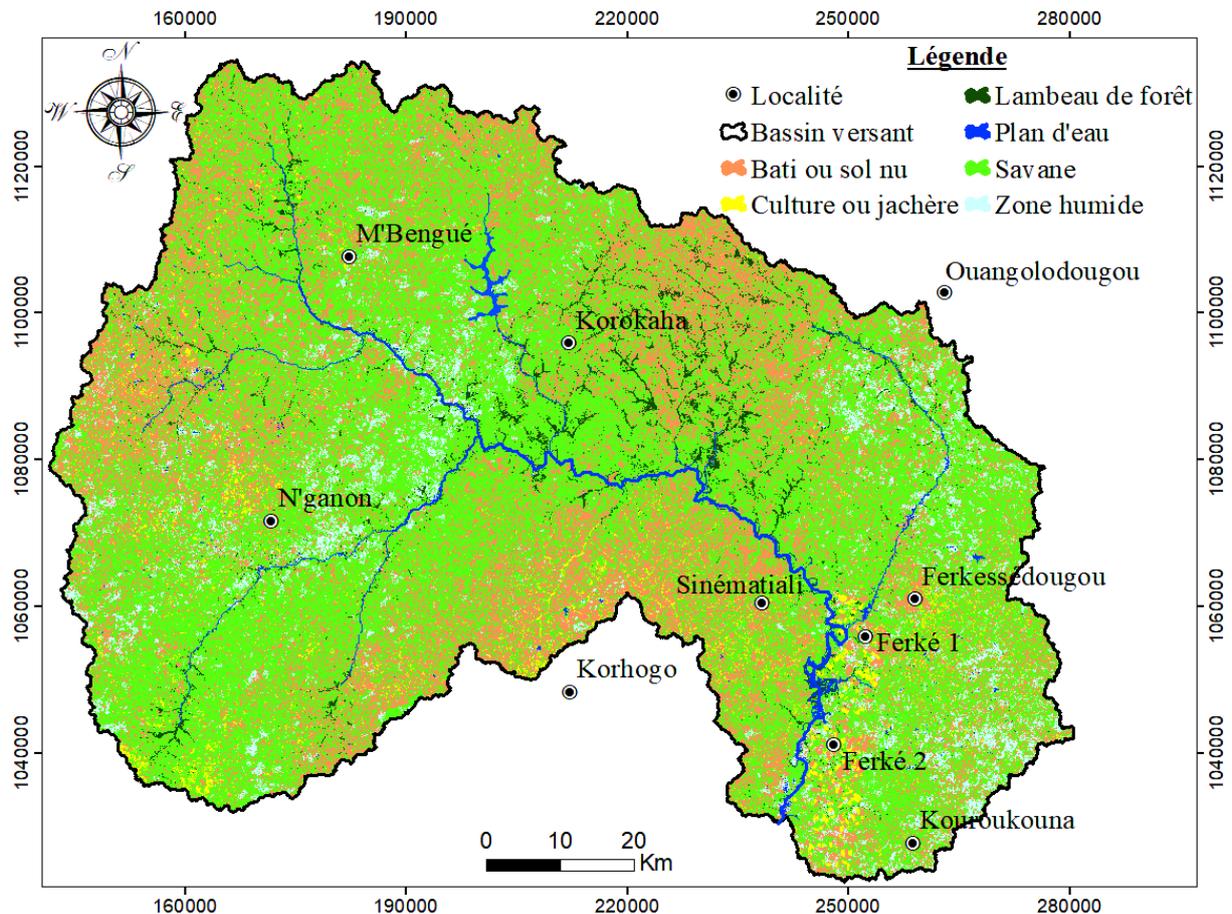


Figure 75 : Carte prédictive de l'occupation des sols de 2020

L'application du test de Mann-Whitney signé au seuil de significativité de 5 % aux superficies simulées et observées (qui donne $p\text{-value} = 0,84 \ll 0,05$) montre qu'il n'existe pas une différence significative entre les superficies simulées par le modèle LCM et celles observées. Les superficies des classes d'occupation des sols simulées et celles observées sont sensiblement égales avec une corrélation de 0,99. Tout de même, il est à préciser que le modèle LCM sous-estime les superficies de savanes et surestime les superficies des bâtis ou sols nus (Figure 76).

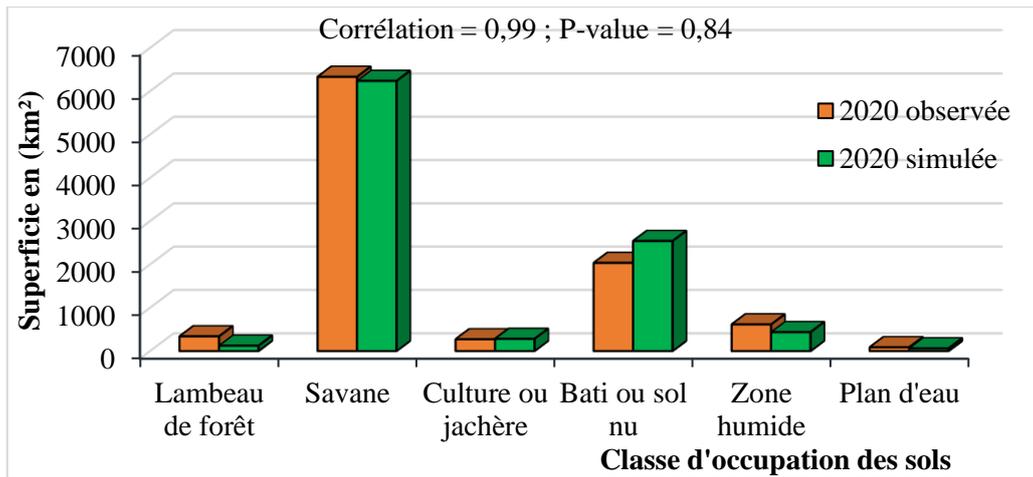


Figure 76 : Comparaison des classes d'occupation des sols simulées et observées de 2020

6.3.3. Génération des scénarios de l'occupation des sols

La précision de la carte prédictive a confirmé la fiabilité du modèle LCM, permettant ainsi d'utiliser ce modèle pour prédire l'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama pour les années 2035 et 2050 en utilisant les cartes de référence de 1990 et 2006. Les cartes prédictives d'occupation des sols pour les années 2035 et 2050 dans le bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha sont présentées à la figure 77A et 77B respectivement. Cette figure nous permet d'observer les variations spatiales et temporelles de l'occupation des sols sur ce bassin versant. Elle met en évidence une expansion significative de la classe des bâtis ou des sols nus à l'est de la localité de Korokaha, à l'extrême ouest du bassin versant et dans la zone entre Korhogo et Sinématiali. Cependant, au sud du bassin versant, les zones de cultures ou de jachères pourraient progressivement céder la place à des zones de sols nus ou de bâtiments (Figure 77A et 77B).

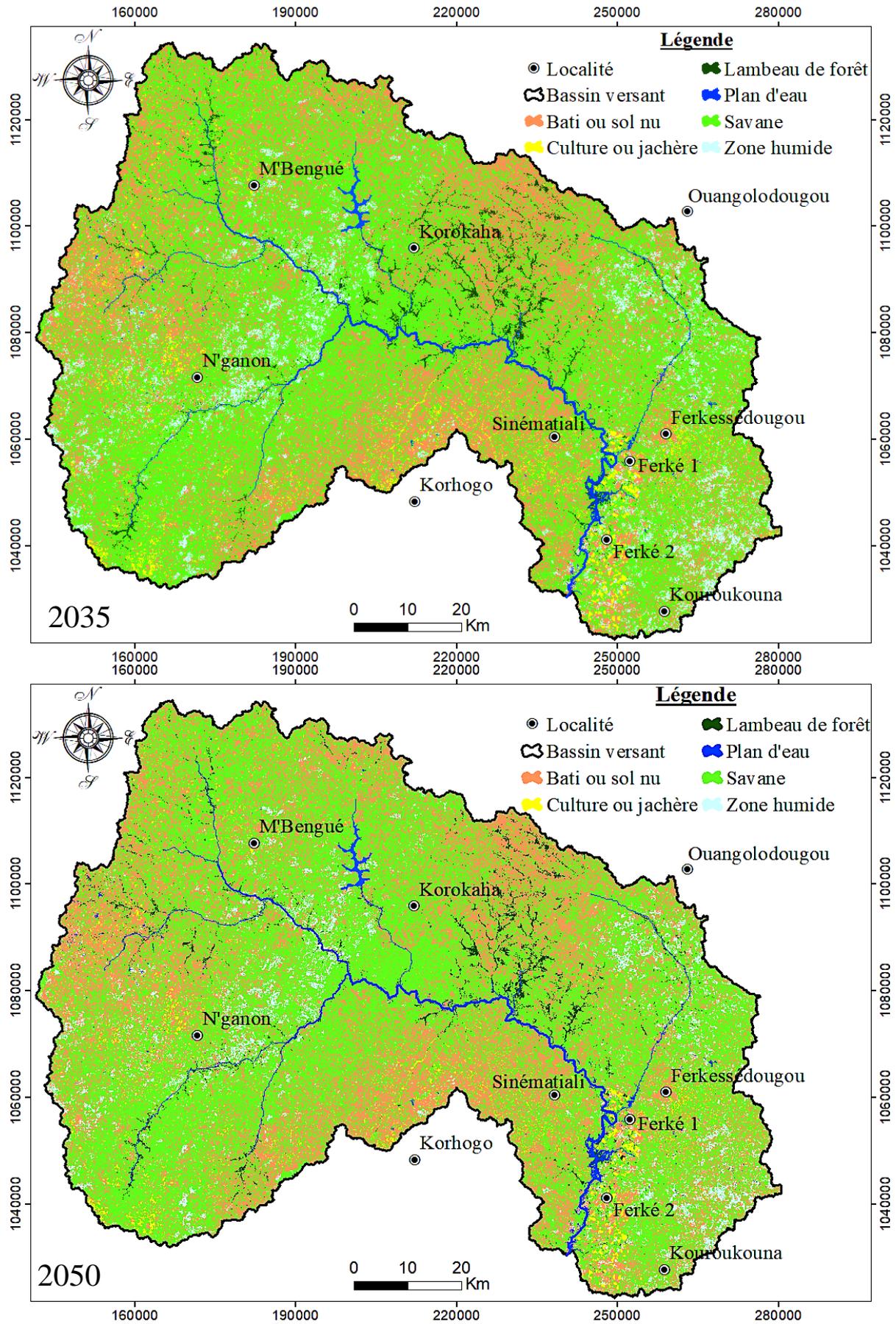


Figure 77 : Cartes de l'occupation des sols de 2035 et 2050

6.3.4. Analyse diachronique de l'occupation des sols du bassin versant

La figure 78 et le tableau XXXVI présentent respectivement l'évolution temporelle ainsi que les gains et pertes de l'occupation des sols sur deux périodes 2020-2035 et 2035-2050. Ils montrent également que sur ces deux périodes retenues pour le bassin versant du Haut Bandama à Badikaha, la surface des savanes diminuera très significativement tandis que la surface des bâtis ou sols nus augmentera significativement sur la période 2020-2035. Cette tendance persistera sur la période de 2035 à 2050. Les classes culture ou jachère et zone humide évolueront et tendront à se stabiliser sur la période 2035-2050 tandis que la superficie des lambeaux de forêt et les plans d'eau diminueront progressivement sur l'ensemble de la période. La plupart des classes d'occupation des sols auront des pertes de superficie exceptée la classe bâti ou sol nu qui aura un gain de plus de 1 137 et 55 km² respectivement sur les périodes 2020-2035 et 2035-2050.

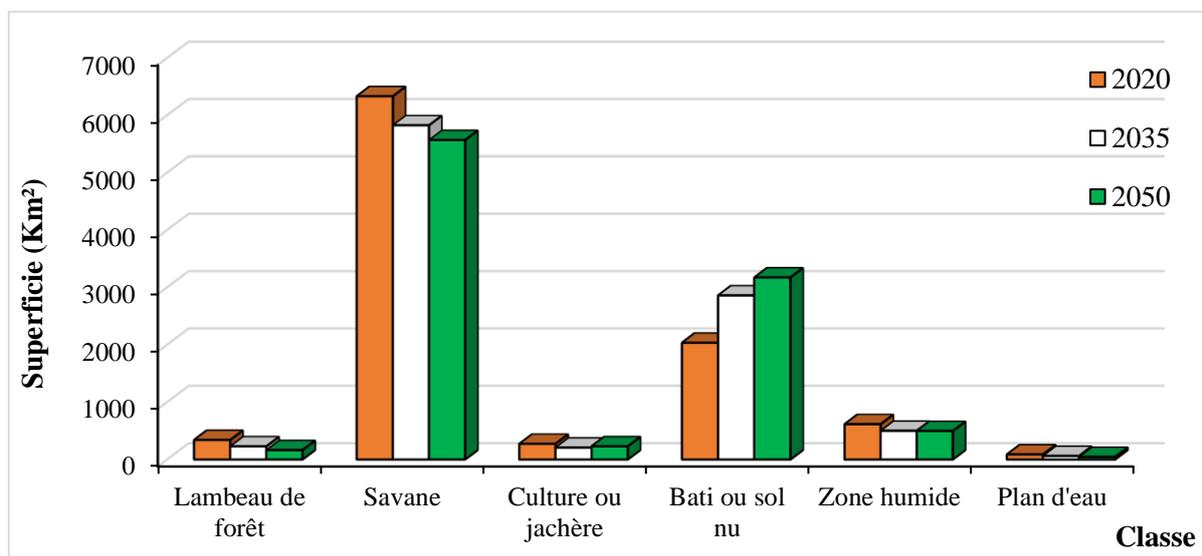


Figure 78 : Évolution de l'occupation des sols de 2020 à 2050

Tableau XXXVI : Analyse des gains et pertes de l'occupation des sols de 2020 à 2050

Classe	Surface 2020 (km ²)	Surface 2035 (km ²)	Surface 2050 (km ²)	2020-2035		2020-2050	
				Gain et perte (km ²)	Pourcen- tage (%)	Gain et perte (km ²)	Pourcen- tage (%)
Lambeau de forêt	340,85	229,37	163,85	-111,48	-32,71	-177	-51,93
Savane	6333,31	5826,1	5568,93	-507,21	-8,01	-764,38	-12,07
Culture ou jachère	273,19	207,82	229,79	-65,37	-23,93	-43,4	-15,89
Bâti ou sol nu	2035,89	2860,85	3183,13	824,96	40,52	1137,24	55,86
Zone humide	616,14	500,62	496,96	-115,52	-18,75	-119,18	-19,34
Plan d'eau	88,26	62,89	44,99	-25,78	-29,21	-43,27	-49,03

6.4. Impact de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols sur le coefficient de ruissellement

L'analyse de l'état de surface des sols et la synthèse des études antérieures sur les coefficients de ruissellement des bassins versants expérimentaux ont permis d'obtenir les coefficients de ruissellement (K_{ri}) de chaque classe d'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama (Tableau XXXVII). Les savanes, Les lambeaux de forêt et les cultures ou jachères présentent les K_{ri} les plus bas (respectivement 7 %, 14 % et 21 %). En revanche, les bâtis ou sols nus, les zones humides et les plans d'eau présentent des K_{ri} élevés. (70, 80 et 100 % respectivement).

Tableau XXXVII : Coefficients de ruissellement selon l'occupation des sols

État de surface	Coefficient de ruissellement K_{ri} (%)
Lambeau de forêt	7
Savane	14
Culture ou jachère	21
Bâti ou sol nu	70
Zone humide	80
Plan d'eau	100

La figure 79 montre l'évolution temporelle du coefficient de ruissellement moyen annuel dans le bassin versant du Haut Bandama. Sur la période 1990-2006, on assiste à une augmentation du coefficient de ruissellement qui passe de 18,5 % à 28,5 %. De même sur la période 2006-2020 on constate une légère augmentation allant de 28,5% en 2006 à 30,7% en 2020. Cette dernière évolution pourrait se poursuivre jusqu'à sur la période 2021-2050 avec 34,5% en 2035 et 36,4% en 2050.

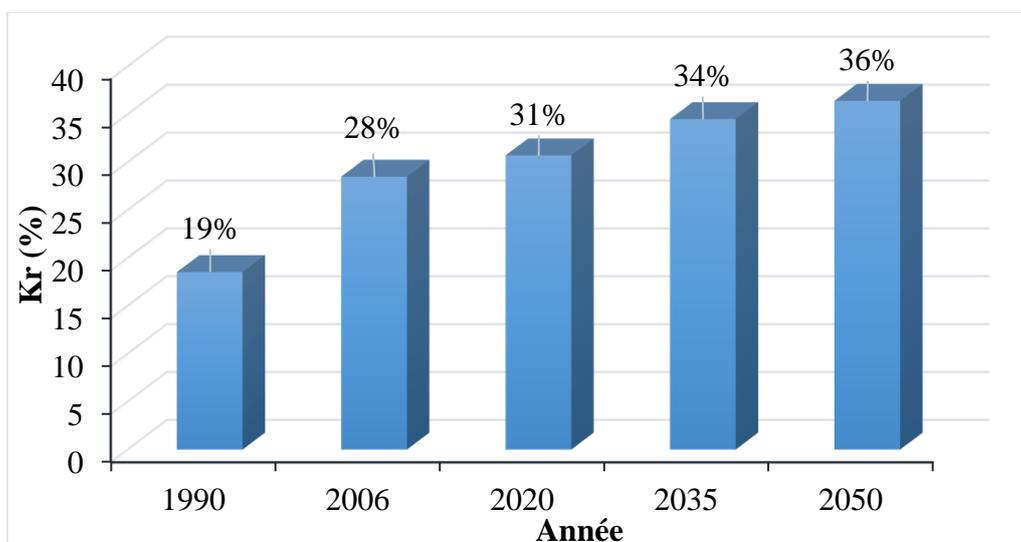


Figure 79 : Évolution temporelle du coefficient de ruissellement moyen annuel sur la période 1990-2050

6.5. Discussion

Les prétraitements des images Landsat TM, ETM+ et OLI TIR respectivement des années 1990, 2006 et 2020 effectués sous ENVI 4.7 ont abouti à 6 unités d'occupation des sols (lambeau de forêt, savane, culture ou jachère, bâti ou sol nu, zone humide et plan d'eau) dans le bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha. La précision et le coefficient de Kappa obtenus lors de la classification des images jugent de la performance du traitement effectué sur ces images. En effet, selon Anderson *et al.* (1971), si le pourcentage (la précision) de pixels correctement classifiés est supérieur à 85 % et le coefficient de Kappa supérieur à 0,80, la carte d'occupation des sols est jugée acceptable (Tso & Mather, 2001 ; Mather, 2004 ; Chalifoux *et al.*, 2006). Mieux, Pontius (2000) affirme qu'une étude de l'occupation des sols peut être validée si l'indice Kappa est compris entre 50 % et 75 %. Les précisions globales et le coefficient de Kappa obtenus dans cette étude sont supérieurs à ceux de Koné *et al.* (2020) dans la sous-préfecture de Nappié dans la région du Poro qui pourrait se justifier par des dates plus récentes des images et d'une bonne combinaison des canaux d'image dans le traitement. C'est ce que montrent les études de Boulahouat & Naert (1996) et de Manandhar (2009) qui affirment qu'une bonne combinaison de canaux permet d'assurer un bon résultat de classification de la couverture du sol. La classification de l'occupation des sols des années 1990, 2006 et 2020 a permis de quantifier et cartographier les différentes classes que sont les lambeaux de forêt, la savane, les bâtis ou sols nus, les cultures ou jachères, les zones humides et les plans d'eau.

De façon générale, on observe un dynamisme au niveau de chaque classe d'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama à Badikaha. Au cours de la période 1990-2006, on observe une importante progression de la superficie des classes de cultures ou jachères (30,44 %), des zones humides (83,10 %) et des bâtis ou sols nus (400,03 %). Contrairement à ces classes, les lambeaux de forêt (-48,89 %), les savanes (-14,88 %) et les plans d'eau (-4,80 %) connaissent une diminution importante. En effet, la période 1990-2006 se situe en grande partie dans une période politiquement stable de la Côte d'Ivoire où les activités humaines sont en pleine croissance (construction et développement d'infrastructure, croissance démographique, etc.). Effectivement, la présence des industries de transformation de canne (SUCAF-CI) et de coton (Coton-Ivoire) dans cette partie de la Côte d'Ivoire, pourraient favoriser la surexploitation de la couverture végétale. En raison de leur présence, les populations dans cette zone vont faire profit à travers la création et l'augmentation des superficies agricole des cultures ou jachères. C'est le même constat fait par Mahé en 2006 lorsqu'il affirme que les infrastructures incitent la croissance démographique et le développement des activités anthropiques qui intensifient les modifications de l'occupation des sols et des états de surface. Ces activités anthropiques

entraînent une régression de la superficie initiale des classes de lambeau de forêt, de savane et de plan d'eau au profit des classes de cultures ou jachères. La classe zone humide a doublé de superficie en 15 ans en raison du retrait des plans d'eau et de l'exploitation de la végétation aquatique laissant apparaître ces terres humides. Les zones humides qui présentent une distribution éparses sont utiles dans le maintien de la biodiversité et la qualité des ressources en eau (N'ghiém, 2011). Mais il convient de préciser que les activités anthropiques ne sont pas les seuls facteurs de modification des terres. Le climat est l'un des principaux facteurs naturels de modification de l'état de surface des sols. C'est en cela que Fossou *et al.*, (2017), affirment dans leur étude sur la variabilité climatique et son incidence sur l'occupation des sols dans la région du N'zi que la modification des terres serait due à l'action combinée de la réduction de la pluviométrie et des activités anthropiques. Effectivement, on a observé une réduction du nombre de jours consécutifs de pluie et de façon générale, une diminution des cumuls annuels de précipitation sur le BVHBKB. Ces observations sur la dynamique de l'occupation des sols sur la période 1990-2006 prévalent sur la période 2006-2020. Seule la classe des zones humides est restée relativement stable sur cette période. Cependant, cette modification de l'état de surface des sols sur la période 2006-2020 est moins accentuée par rapport à la période précédente (1990-2006). On note tout de même une régression des superficies de lambeaux de forêt, de savanes et de plans d'eau au profit des cultures ou jachère ainsi que les bâtis ou sols nus dues probablement aux facteurs naturels cités plus haut. L'analyse de la dynamique de l'occupation des sols passés permet d'appréhender l'évolution de l'occupation des sols futurs (horizons 2035 et 2050) à l'aide des cartes d'occupation des sols de 1990, 2006 et 2020. Le traitement de ces images à l'aide du module LCM donnent des indices de Kappa supérieurs à 0,80 et une précision globale dépassant 85 %, ce qui rend le traitement acceptable et le modèle viable pour la prédiction. Les changements de l'occupation des sols observés entre 1990 et 2006 intégrés dans le sous-modèle de transition (LCM) ont montré que la plupart des catégories d'occupation des sols ont des gains et/ou des pertes. La validation du modèle LCM s'est effectuée par comparaison de la carte prédictive en 2020 avec la carte de référence de 2020. Elles montrent que la précision globale et le coefficient de Kappa de cette carte prédictive qui sont respectivement 82 % et 0,81 dépassent les valeurs recommandées (80 % et 0,80 respectivement). Ainsi, ces valeurs de précision globale et de Kappa montrent que le modèle LCM est bien calibré et viable pour les prédictions à l'horizon 2035 et 2050. A l'horizon 2035 et 2050, les cartes prédictives montrent que l'expansion des zones bâtis ou sols nus auront une évolution respective de 40,52 % et 55,86 % plus à l'est de la localité de Korokaha, à l'extrême Ouest du bassin versant et la zone entre Korhogo et Sinématiali. A l'exception des classes bâti

ou sol nu, toutes les autres classes d'occupation des sols perdront en superficie au profit des bâtis ou sols nus. La perte de la couverture végétale annonce une avancée du désert dans cette partie de la Côte d'Ivoire aux horizons 2035 et 2050. Cette régression des classes d'occupation des sols affecte plus les classes de lambeaux de forêts de 32,71 % et 51,93 % aux horizons 2035 et 2050 respectivement. Elles sont suivies des classes de plan d'eau avec un taux de -29,21 % en 2035 et -49,03 % en 2050. La dynamique de l'état de surface des sols n'est pas sans conséquence sur le ruissellement. La période 1990 à 2006 a connu une augmentation du coefficient de ruissellement qui passe de 18,5 % à 28,5 % respectivement et de 28,5 % en 2006 à 30,7 % en 2020 pour la période 2006-2020. Cette dernière évolution se poursuivra jusqu'à la période 2021-2050. L'augmentation du coefficient de ruissellement est due à l'urbanisation ou des sols nus et aux cultures extensives. En effet, l'extension du tissu urbain et des cultures provoquent une augmentation des coefficients de ruissellement des bassins versants (Fehri et Yadh, 2016). L'urbanisation et l'agriculture se présentent donc comme le facteur anthropique à la base de l'augmentation du coefficient de ruissellement moyen sur les bassins versants (Sawadogo, 2020).

Conclusion partielle

Le traitement des images Landsat TM, ETM+ et OLI TIR respectivement des années 1990, 2006 et de 2020 effectué sous ENVI 4.7 a permis d'établir la dynamique d'occupation des sols passée et leur prédiction aux horizons 2035 et 2050 à l'aide du modèle LCM. Il en ressort que de 1990 à 2020, la superficie du couvert végétal, en général, s'est considérablement réduite au profit des zones de cultures, bâtis ou sols nus. Les changements de l'occupation des sols observés entre 1990 et 2006 intégrés dans le sous-modèle de transition (LCM) ont montré que la plupart des catégories d'occupation des sols ont des gains et/ou des pertes. A l'exception des classes bâties ou sols nus, toutes les autres classes d'occupation des sols perdront en superficie au profit des bâtis ou sols nus. Ainsi, pour une telle dynamique de l'occupation des sols associée au changement climatique, comment vont évoluer les ressources en eau dans le BVHBKB ?

CHAPITRE 7 : ÉVOLUTION DES RESSOURCES EN EAU SUR LA PÉRIODE 2021-2050

7.1. Limite du bassin, sous bassin et répartition des unités de réponse hydrologique

Le bassin versant du Haut Bandama délimité à partir de l'exutoire Route Korhogo-Badikaha par le modèle agro-hydrologique SWAT a une superficie d'environ 9688 km² avec 49 sous bassins et 49 URH. La figure 80 et le tableau XXXVIII récapitulent les proportions d'URH.

L'analyse de ce tableau montre que la subdivision des sous bassins en URH est fonction de l'occupation des sols, de la pente, de la topographie et du réseau hydrographique. En effet, dans la rubrique de discrétisation des URH, l'accent est mis sur la dominance des variables pour le choix des URH. Ainsi, le nombre de sous-bassin (49 sous-bassins) correspond après discrétisation au nombre d'URH (49 URH). Le plus grand sous-bassin versant est le sous bassin 34 et est également l'URH la plus grande avec environ une superficie de 1225 km² soit plus de 12% de la superficie totale du bassin versant (Tableau XXXVIII et figure 80).

Tableau XXXVIII : Proportion des sous bassins et des unités de réponses hydrologiques du bassin versant

N° sous-bassin = N° URH	Superficie en km ²	Proportion en (%)	Elévation Max (m)	N° sous-bassin = N° URH	Superficie en km ²	Proportion en (%)	Elévation max (m)
1	133,14	1,37	417	26	346,54	3,58	443
2	165,37	1,71	394	27	132,42	1,37	433
3	135,08	1,39	437	28	157,59	1,63	404
4	42,42	0,44	392	29	252,26	2,60	414
5	135,76	1,40	390	30	263,43	2,72	572
6	143,75	1,48	391	31	186,17	1,92	459
7	108,63	1,12	379	32	88,69	0,92	411
8	587,93	6,07	417	33	434,27	4,48	387
9	218,26	2,25	452	34	1225,28	12,65	514
10	184,63	1,91	412	35	212,74	2,20	502
11	82,85	0,86	403	36	10,28	0,11	355
12	175,51	1,81	384	37	171,10	1,77	427
13	307,46	3,17	402	38	622,36	6,42	600
14	413,96	4,27	620	39	80,77	0,83	371
15	182,64	1,89	392	40	18,86	0,19	359
16	203,51	2,10	407	41	158,19	1,63	423
17	249,83	2,58	403	42	463,16	4,78	516
18	150,93	1,56	394	43	137,65	1,42	393
19	62,70	0,65	365	44	44,96	0,46	368
20	0,82	0,01	312	45	44,24	0,46	376
21	110,75	1,14	381	46	142,86	1,47	436
22	15,82	0,16	346	47	46,60	0,48	370
23	133,89	1,38	377	48	216,50	2,23	432
24	145,57	1,50	415	49	31,64	0,33	372
25	107,88	1,11	431				

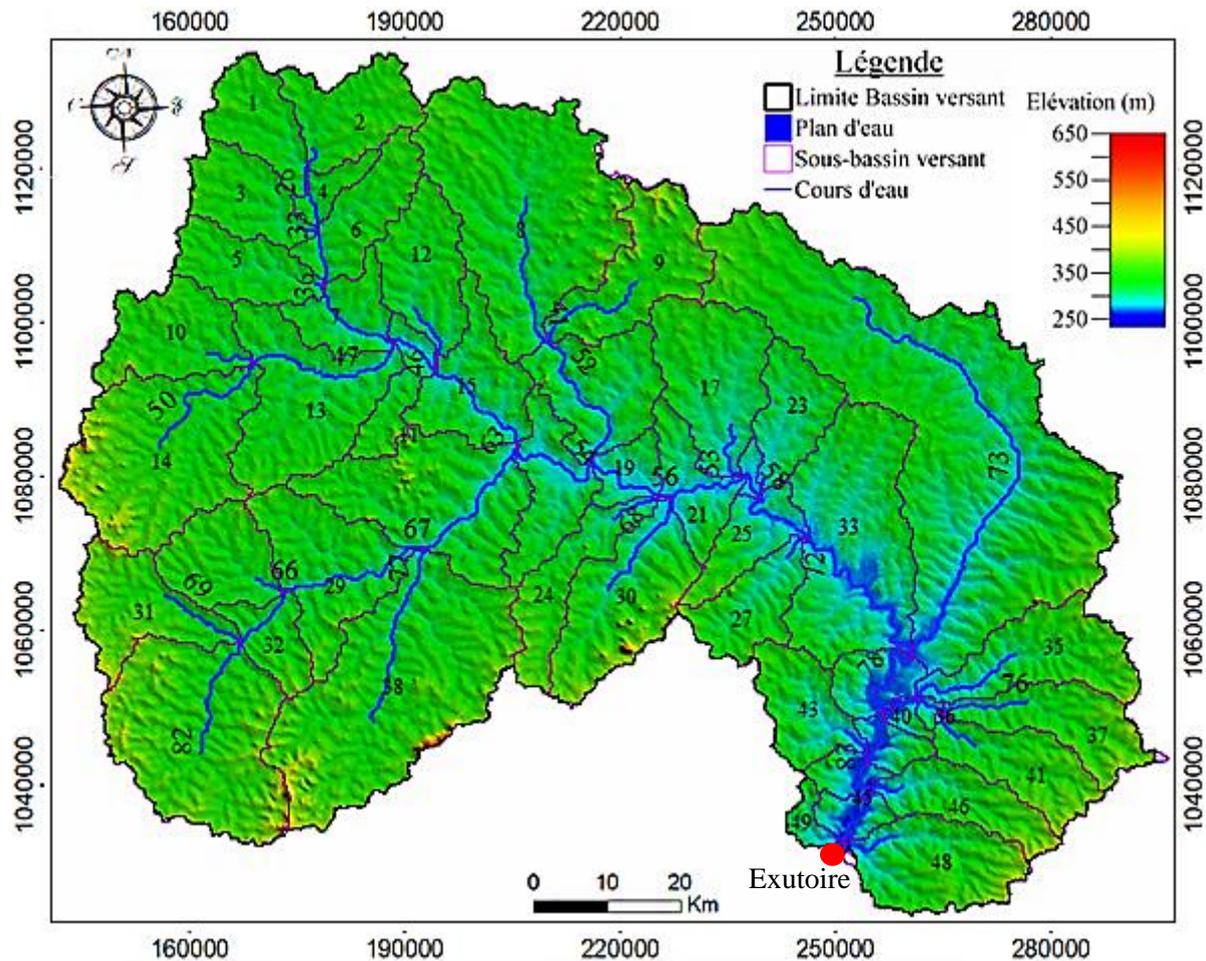


Figure 80 : Bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha et ses sous bassins délimités

7.2. Résultats de l'analyse de sensibilité et de calibration du modèle SWAT

Certains paramètres du modèle SWAT ont révélé la nécessité d'être affinés et ont donc été ajustés à partir de l'analyse de sensibilité avec l'outil SWAT-CUP. À la fin de l'analyse de sensibilité, 5 paramètres (ALPHA_BF, RCHRG_DP, SOL_AWC, CH_W2 et CH_N1) se sont avérés plus sensibles avec les valeurs du t-Stat élevée et de P-Values faible (P-value <0,05) (Tableau XXXIX). Le t-Stat exprime la mesure de la sensibilité d'un paramètre, tandis que la p-valeur indique son importance. Plus la valeur absolue du t-stat est élevée et plus la p-valeur est proche de zéro (0) et plus le paramètre est sensible. Dans l'analyse de sensibilité globale effectuée, toutes les valeurs des paramètres de la dernière itération sont retenues, cependant, la capacité en eau disponible de la couche de sol (SOL_AWC) nécessite encore des ajustements car le p-value reste élevé.

Tableau XXXIX : Paramètres très sensibles

Paramètres	t-Stat	P-Value
ALPHA_BF.gw	-1,500	0,0610
RCHRG_DP.gw	-1,620	0,0430
SOL_AWC().sol	0,630	0,430
CH_W2.rte	-4,190	0,000
CH_N1.sub	9,500	0,000

La calibration s'est faite à l'exutoire du bassin versant (Route Korhogo-Badikaha). Lors des itérations, les paramètres de fortes sensibilités ont été réajustés pour accroître la performance du modèle. Les ajustements des valeurs des paramètres de sensibilité se font en réduisant ou augmentant l'intervalle (min et max) de recherche de la valeur réelle des paramètres. Le tableau XL récapitule les résultats des 5 paramètres réajustés dans le module SUFI2 de SWAT-CUP avec leurs valeurs respectives.

Ce tableau montre que la valeur (0,424) du facteur du débit de base (ALPHA_BF) est faible (proche de 0) tandis que la fraction de percolation de l'eau dans l'aquifère profond (RCHRG_DP = 0,869) est élevée (proche de 1). On observe en outre que la valeur du paramètre traduisant la capacité en eau du sol (SOL_AWC = 0,245) est relativement proche de 0. Les valeurs des paramètres liés à la morphologie du lit du cours d'eau (CH_W2 et CH_N1 de valeurs respectives 107,823 et 6,550) sont supérieures à 0. Au calage, le coefficient de Nash NSE et le coefficient de corrélation R^2 obtenus sont respectivement de 69 % et 70 % jugeant d'une bonne calibration d'où une bonne similarité entre les débits simulés et ceux mesurés. Le pourcentage de biais sur les débits simulés sur la période 1981-1985 est de -5,7 % qui est inférieur à 0 montrant ainsi que le modèle surestime les débits simulés au calage. Le PBIAS < 0 indique que le modèle surestime les débits à l'exutoire du bassin versant. Les valeurs du NSE, R^2 et du PBIAS indiquent une bonne performance du modèle à la calibration (Figure 81).

Tableau XL : Valeurs réajustées des paramètres très sensibles

Paramètres	Valeur Ajustée	Définition
ALPHA_BF.gw	0,424	Facteur de réponse de la nappe phréatique superficielle
RCHRG_DP.gw	0,869	Fraction de l'eau du sol qui rejoint la nappe profonde
SOL_AWC().sol	0,245	Capacité en eau disponible de la couche de sol
CH_W2.rte	107,823	Largeur moyenne du cours d'eau principal
CH_N1.sub	6,550	Valeur "n" de Manning pour les cours d'eau affluents

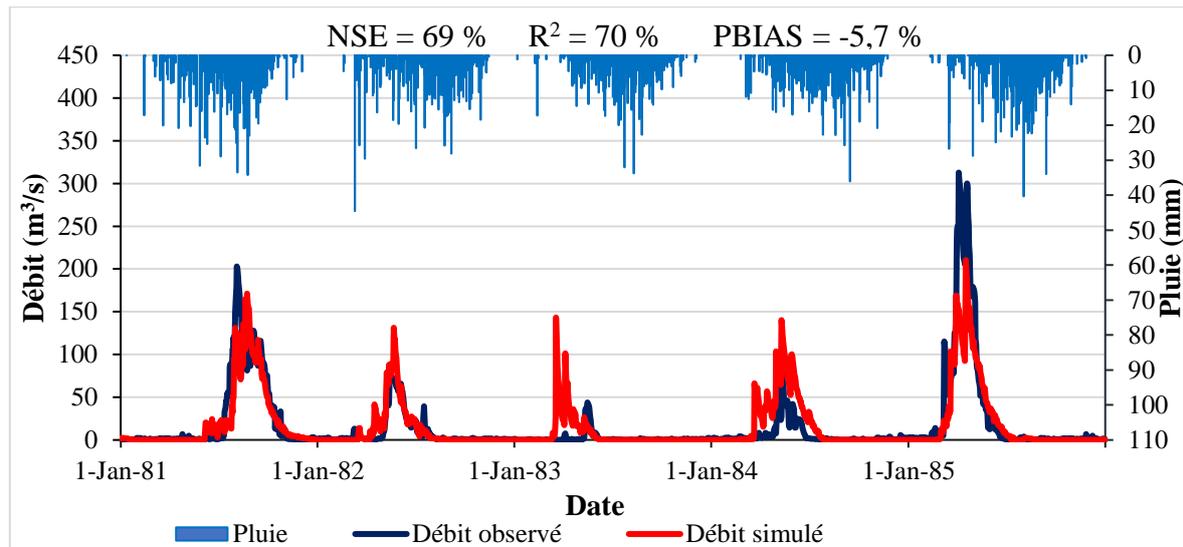


Figure 81 : Comparaison des débits journaliers simulés et des débits journaliers observés à la station Route Korhogo-Badikaha sur la période 1981-1985

7.3. Résultats de la validation du modèle SWAT

La figure 82 montre les résultats de validation du modèle SWAT sur la période 1986-1990. A la fin de la simulation les valeurs de NSE et R^2 obtenues sont tous deux de 77 %. Le pourcentage de biais sur les débits simulés lors de cette validation est de 6,6 %. Le $PBIAS > 0$ indique que le modèle sous-estime les pics de crue à l'exutoire du bassin versant. Ces valeurs montrent une très bonne performance du modèle SWAT et donc viable pour la modélisation des paramètres agro-hydrologiques des complexes sucriers Ferké 1 et Ferké 2. Les valeurs du NSE, R^2 et du PBIAS) indiquent une bonne performance du modèle à la validation (Figure 82).

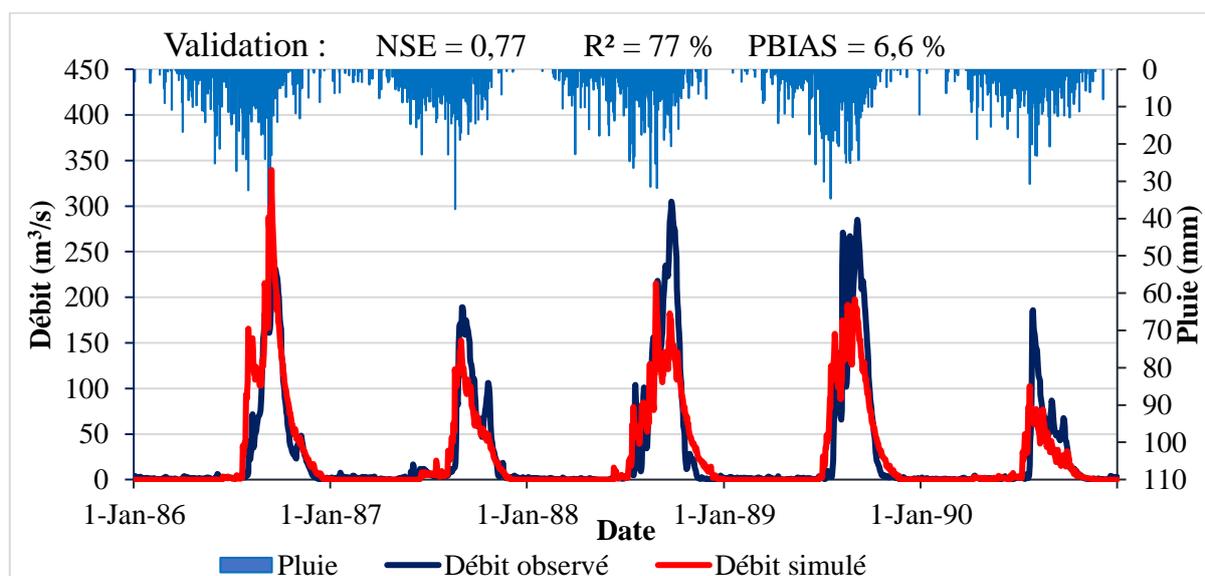


Figure 82 : Comparaison des débits simulés et observés à la station Route Korhogo-Badikaha sur la période 1986-1990

7.4. Évaluation quantitative des ressources en eau dans les complexes sucriers de Ferkessédougou sur la période 1986-1990

7.4.1. Évolution temporelle des ressources en eau sur la période 1986-2016

7.4.1.1. Évolution décennale des débits moyens à l'exutoire du bassin versant

La figure 83 montre l'évolution décennale des débits moyens à l'exutoire du bassin versant. De façon générale, les débits diminuent sur la période 1986-2016. Cependant, à partir de la décennie 1996-2006 (avec un débit moyen annuel de $32,76 \text{ m}^3/\text{s}$) à la décennie 2006-2016 (avec un débit moyen annuel de $37,57 \text{ m}^3/\text{s}$), les débits connaissent une légère hausse de $4,81 \text{ m}^3/\text{s}$.

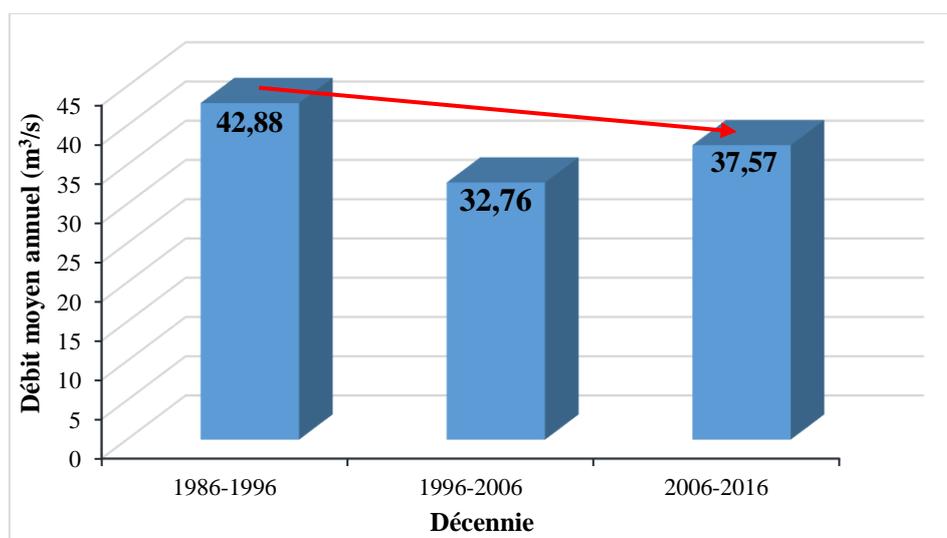


Figure 83 : Évolution décennale des débits sur la période 1986 à 2016 à l'exutoire de bassin versant

7.4.1.2. Évolution décennale des débits moyens à l'entrée des retenues

La figure 84 montre l'évolution des débits entrants dans les retenues de Lokpoho et Morrisson sur la période 1986-2016. Sur cette figure, on assiste à une légère augmentation des débits moyens annuels entrants dans la retenue Lokpoho et à une diminution de ceux-ci dans la retenue Morrisson. Les minimums sont observés sur la décennie 1996-2006 avec des débits moyens annuels de $3,90 \text{ m}^3/\text{s}$ et $29,06 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement pour Lokpoho et Morrisson.

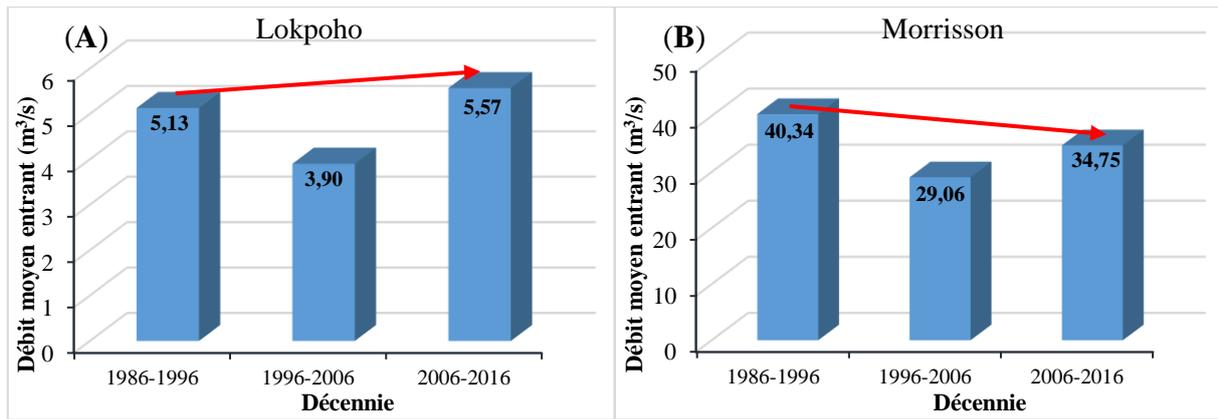


Figure 84 : Évolution décennale des débits moyens journaliers entrants dans les retenues de Lokpoho (A) et Morrison (B)

7.4.1.3. Évolution décennale de l'évaporation sur le bassin versant

La figure 85 montre l'évolution décennale de l'ETP sur le BVHBKB. Sur cette figure, la période 1986-2016 est marquée par une augmentation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) passant de 1841 à la décennie 1986-1995 mm à 1864 à la décennie 1996-2006. Elle atteint 1871 mm à la décennie 1996-2006.

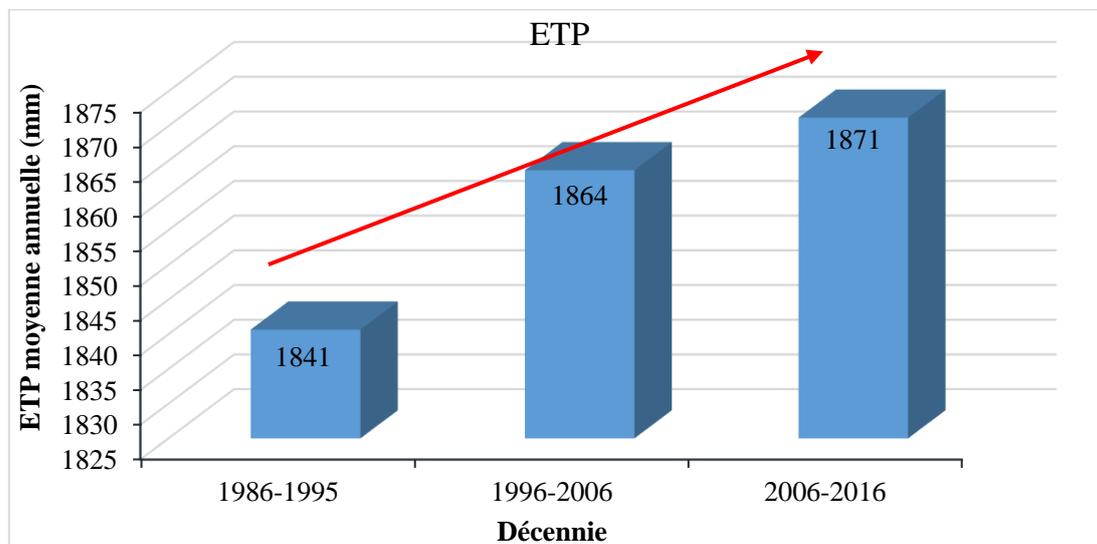


Figure 85 : Évolution décennale de l'ETP et de l'ETR

7.4.1.4. Évolution décennale de l'infiltration sur le bassin versant

La figure 86 montre l'évolution décennale de l'infiltration sur le BVHBKB sur la période 1986-2016. Sur cette figure, la quantité d'eau infiltrée dans le sol est en régression. Partant d'une valeur maximale de 275 mm annuelle sur la décennie 1986-1995, elle diminue de 38 mm et

passé à 237 mm sur la décennie 1996-2005 pour atteindre finalement une valeur minimale de 232 mm sur la décennie 2006-2016 (Figure 86).

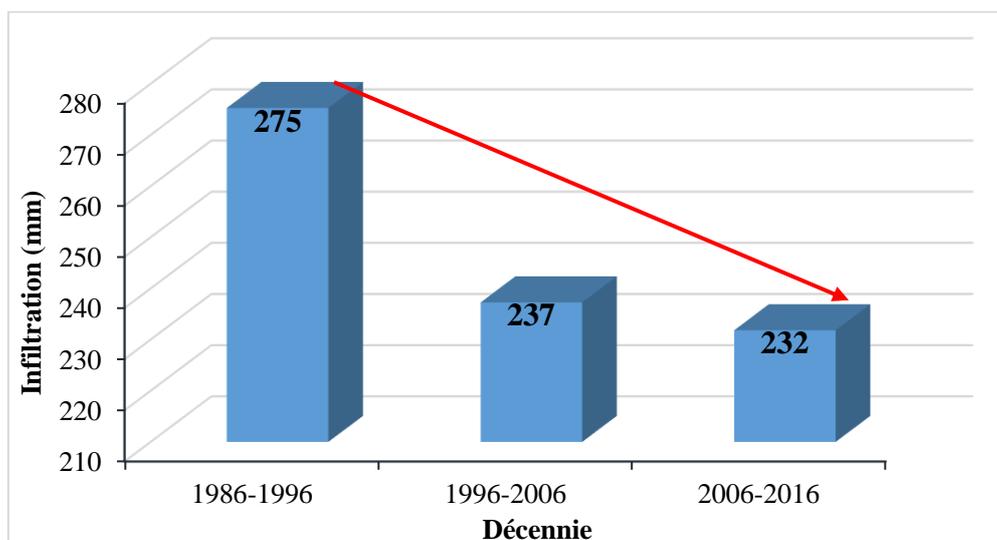


Figure 86 : Évolution décennale de l’infiltration moyenne annuelle

7.4.1.5. Évolution décennale de la recharge des nappes profondes

La figure 87 montre l’évolution de la recharge des nappes souterraines. On assiste à une régression de la recharge annuelle des nappes souterraines passant d’un maximum de 23 mm sur la décennie 1986-1995 de 23 mm à 20 mm sur la décennie 1996 à 2005 pour atteindre un minimum de 19 mm par sur la décennie 2006-2016.

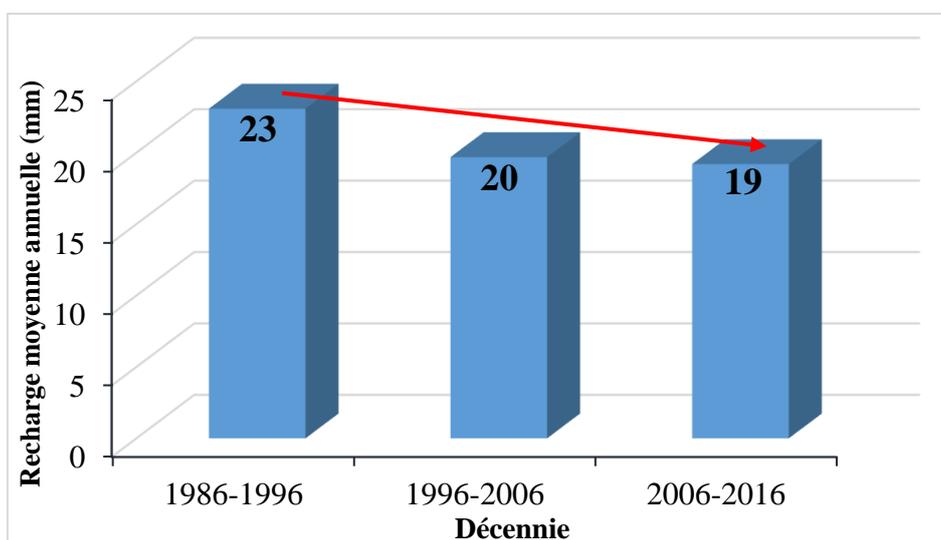


Figure 87 : Évolution de la recharge moyenne annuelle des aquifères souterraines

7.4.2. Évolution spatiale des ressources en eau sur la période 1986-2016

7.4.2.1. Répartition spatiale de la lame d'eau ruisselée sur le bassin versant

La figure 88 montre l'évolution spatiale de la lame d'eau ruisselée sur le bassin versant sur la période 1986-2016. On constate de faible écoulement dans la partie Nord-Ouest et Ouest du bassin avec des lames d'eau inférieures à 32 mm par an au Nord-Ouest de la localité de M'bengué. Dans la zone de Niofoin et au Sud-Ouest du bassin versant, les lames d'eau ruisselées sont comprises entre 32 et 95 mm par an. Les zones de fort écoulement se situent au Centre, à l'Est, au Sud-Est et au Sud du bassin versant avec des lames d'eau ruisselées atteignant 128 mm par an.

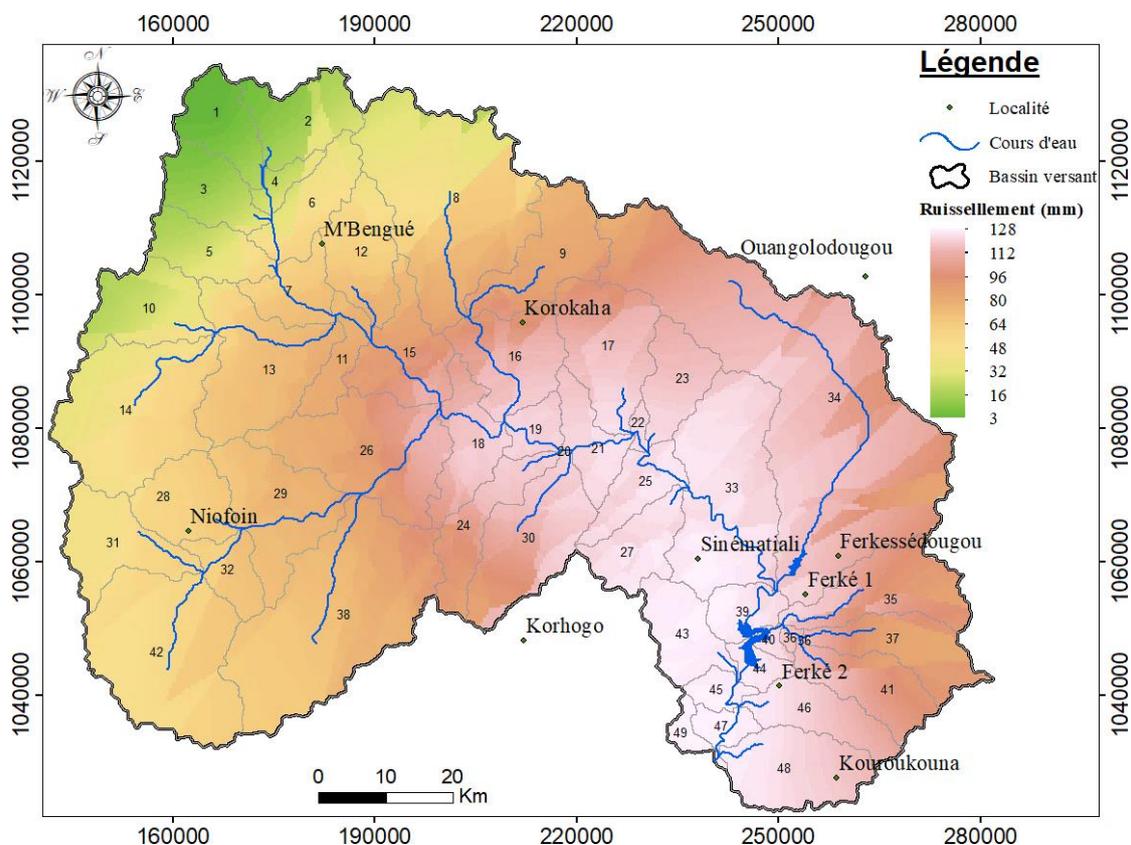


Figure 88 : Carte de répartition spatiale du ruissellement moyen annuel sur la période 1986-2016

7.4.2.2. Répartition spatiale de l'évaporation sur le bassin versant

La figure 89 montre la répartition spatiale de l'ETP (Figure 89A) et de l'ETR (Figure 89B) moyennes annuelles sur la période 1986-2016 dans le bassin versant. Au Sud du bassin versant, dans la localité de Niofoin et aux environs de Korhogo, les valeurs de l'ETP fluctuent entre 1 859 et 1 861 mm. Quant aux valeurs de l'ETR, elles sont élevées à l'Ouest, entre les localités de Niofoin et M'bengué. Aussi on observe de fortes valeurs de l'ETR au Sud-Est du bassin versant. Les plus faibles valeurs de l'ETP et de l'ETR sont observées au Nord et Nord-Est du bassin versant.

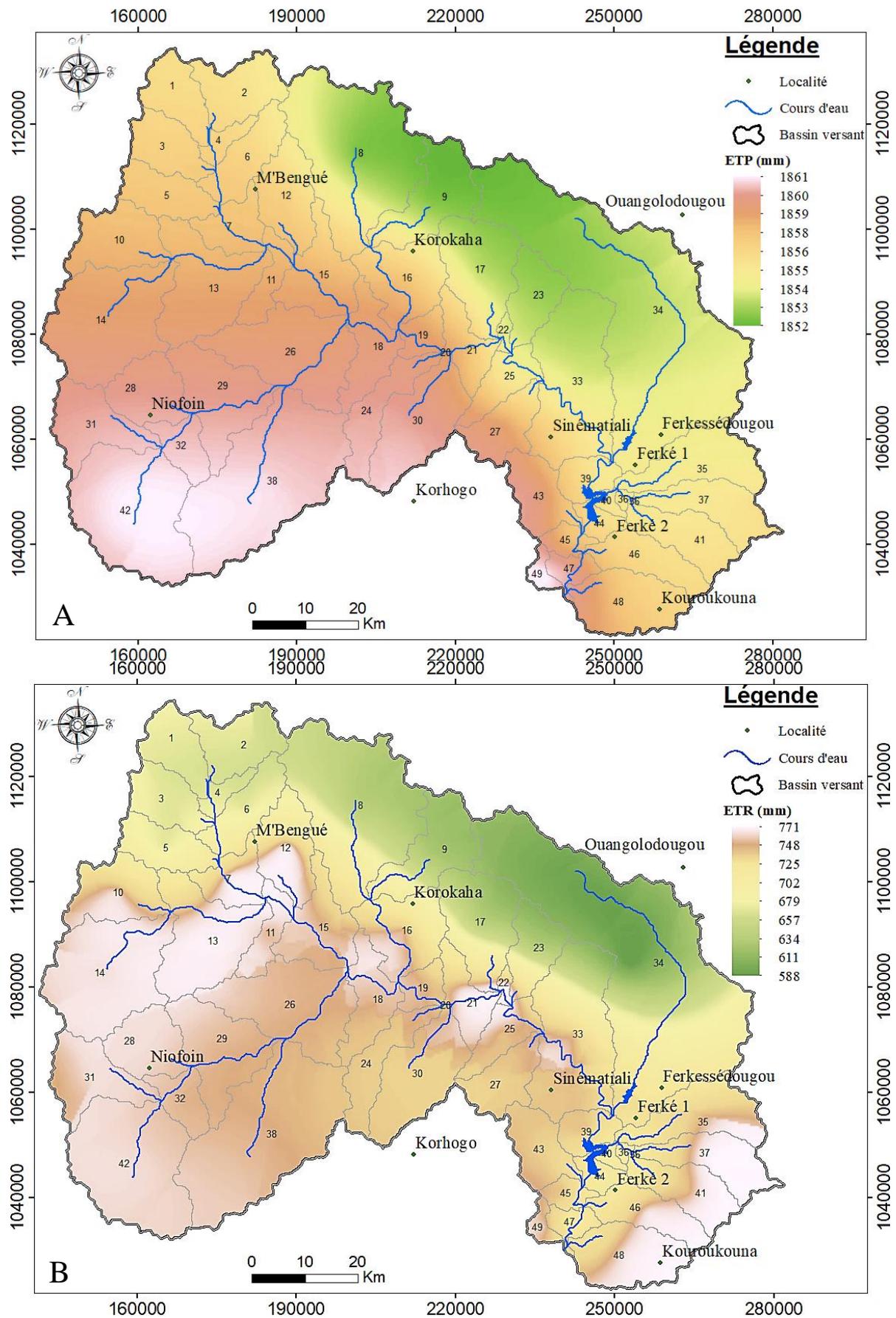


Figure 89 : Carte de répartition spatiale de l'ETP et l'ETR sur la période 1986-2016

7.4.2.3. Répartition des infiltrations sur le bassin versant

La figure 90 montre la spatialisation de la lame d'eau moyenne annuelle infiltrée sur la période 1986-2016 dans le bassin versant. On observe de fortes et moyennes infiltrations dans l'Ouest et au niveau des complexes sucriers Ferké 1 et Ferké 2 avec des valeurs allant de 253 à 316 mm par ans. De faibles valeurs d'infiltration sont observées au Nord et au Sud du Bassin versant avec des valeurs qui varient de 189 à 253 mm.

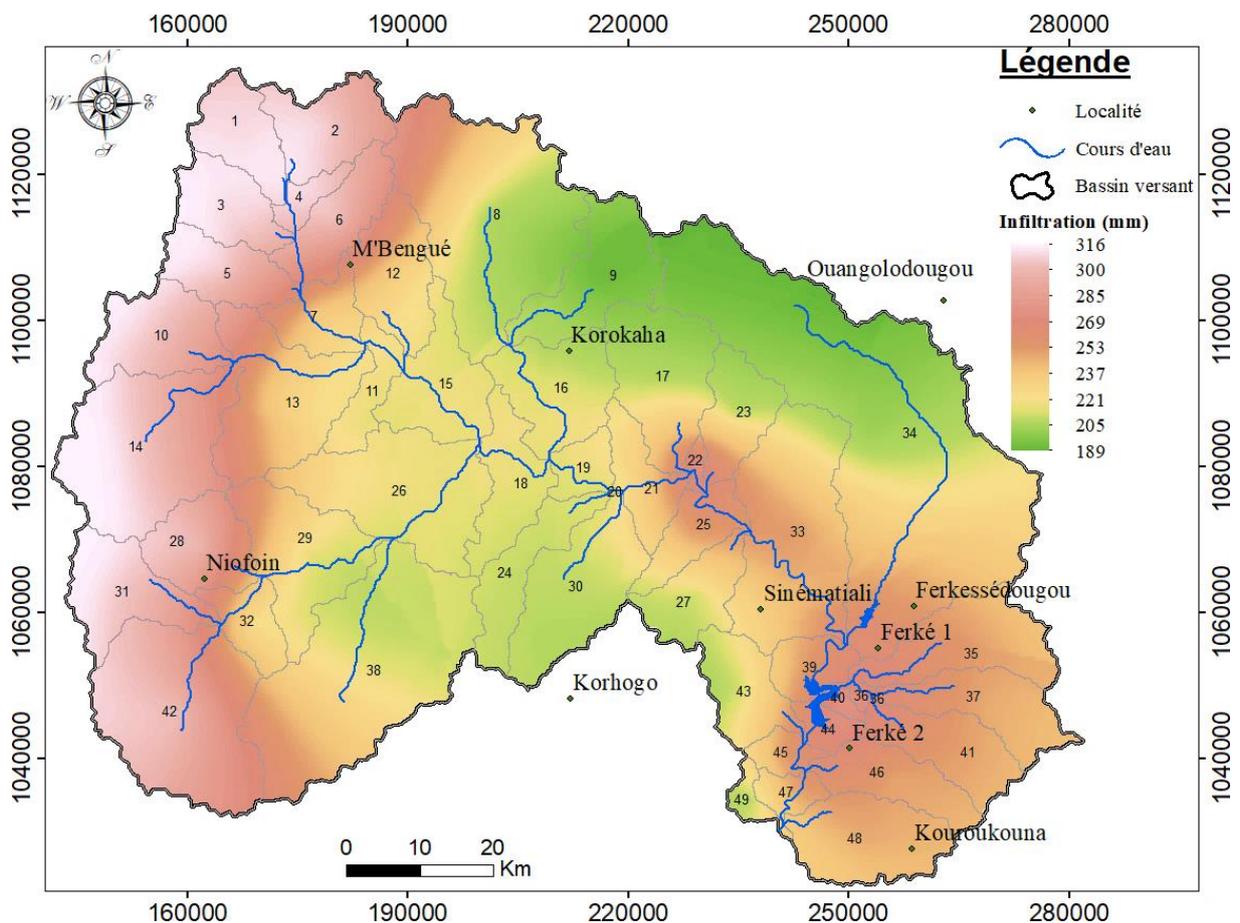


Figure 90 : Carte de répartition spatiale de l'infiltration sur la période 1986-2016

7.4.2.4. Répartition de la teneur en eau du sol sur le bassin versant

La figure 91 montre la répartition spatiale de l'humidité ou teneur en eau du sol sur la période 1986-2016. Au Nord du bassin versant jusqu'au niveau de la localité de Korokaha, les valeurs de l'humidité du sol sont plus élevées et comprises entre 140 et 146 mm. Les valeurs les plus faibles sont observées dans le Sud du bassin versant, surtout au niveau des complexes sucriers de Ferkessédougou avec des valeurs allant de 129 à 137 mm.

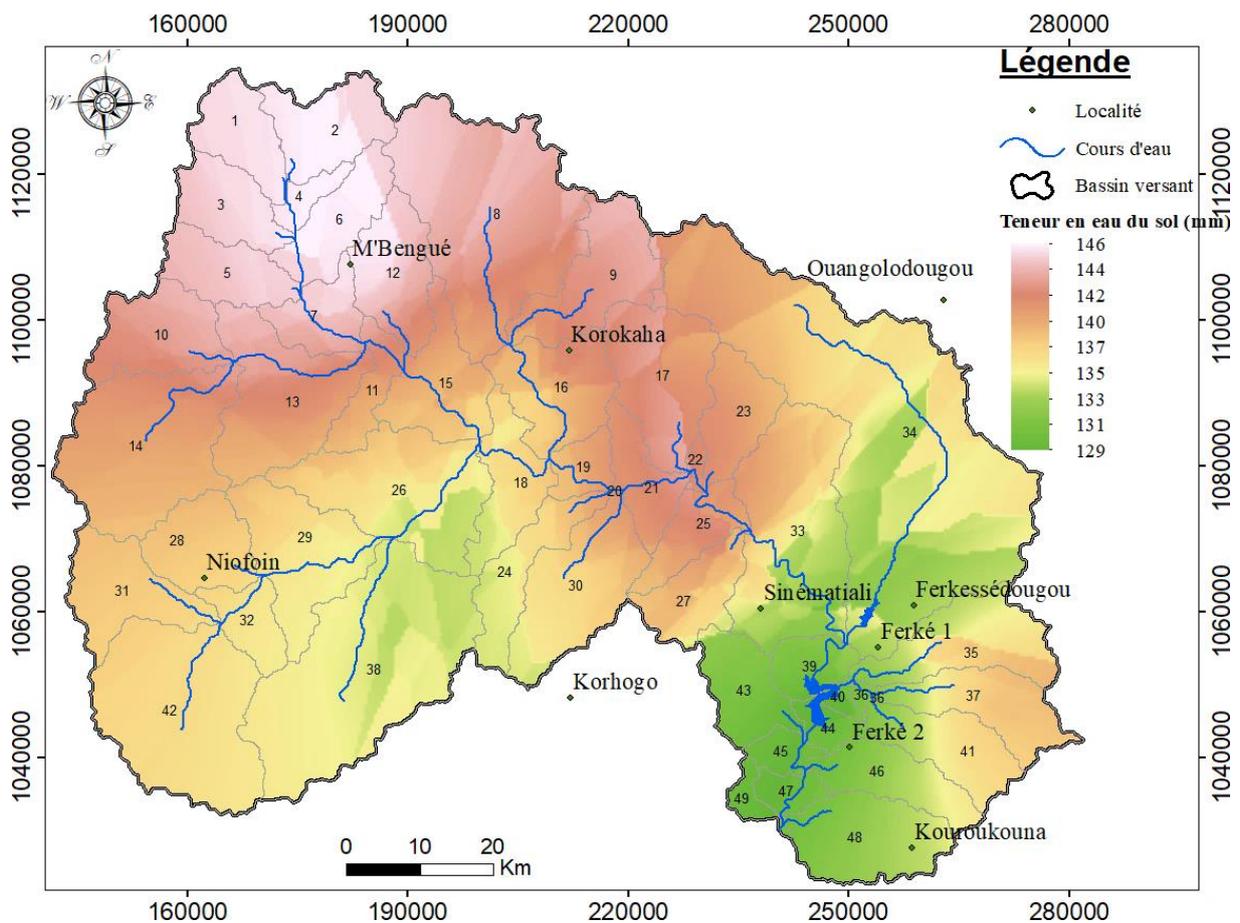


Figure 91 : Carte de répartition spatiale de la teneur en eau du sol sur la période 1986-2016

7.4.2.5. Répartition de la recharge moyenne mensuelle des aquifères

La figure 92 montre la répartition spatiale de la lame d'eau qui alimente les aquifères sur la période 1986-2016. On observe que les zones de fortes recharges se situent principalement à l'Ouest (recharge allant de 10 à 12 mm/mois) et les zones moyennement élevées se situent au niveau des complexes sucriers Ferké 1 et Ferké 2 avec des valeurs allant de 8 à 10 mm par mois. De faibles valeurs de recharge sont observées au Nord et au Sud du bassin versant avec des valeurs allant de 4 à 7 mm par mois.

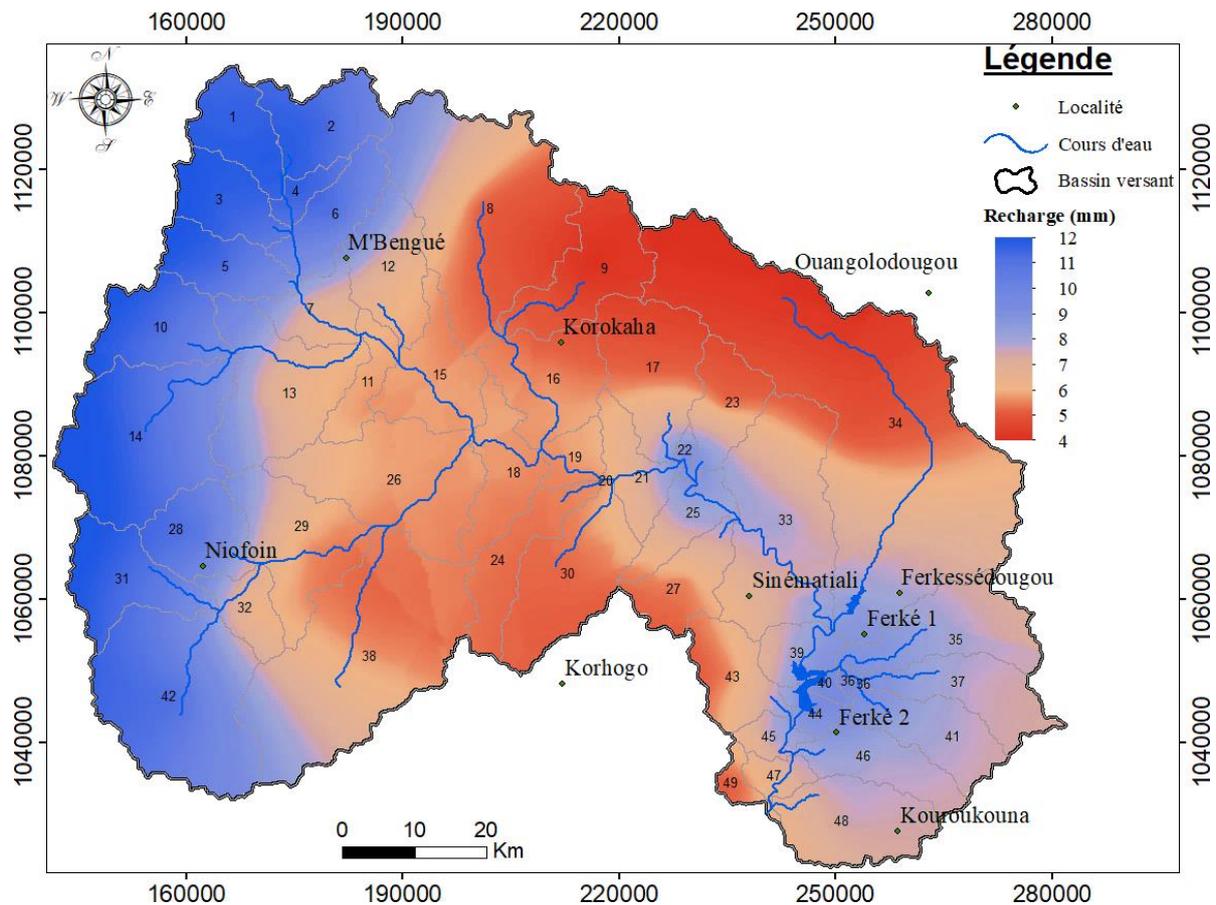


Figure 92 : Carte de répartition spatiale de la recharge moyenne mensuelle des aquifères souterraines sur la période 1986-2016

7.4.3. Évaluation de la capacité des retenues de Lokpoho et Morrisson

7.4.3.1. Évolution du cumul annuels des sédiments dans les retenues Lokpoho et Morrisson

La figure 93 et le tableau XLI donnent l'état d'envasement des barrages de Lokpoho et Morrisson sur la période 1986-2016. De façon générale, on remarque que les deux retenues d'eau connaissent un état d'envasement assez avancé. L'accumulation des sédiments dans la retenue de Lokpoho et de Morrisson a connu une augmentation de volume (Figure 93a et Figure 93b) durant la période 1986-2016.

La retenue de Lokpoho et Morrisson piègent respectivement environ 9,33 et 15,5 mg/L comme concentration de sédiments. Selon la figure 93, chaque année en moyenne 74 500 m³ de sédiments reste dans le fond de la retenue de Lokpoho tandis que celle de Morrisson reçoit dans ses fonds 615 700 m³ par an (Figure 93b). Le volume de sédiment accumulé par les retenues d'eau de Lokpoho et Morrisson sur la période 1986-2016 est d'environ 3 356 600 m³ et 27 709 800 m³ respectivement pour la retenue de Lokpoho et Morrisson (Tableau XLI).

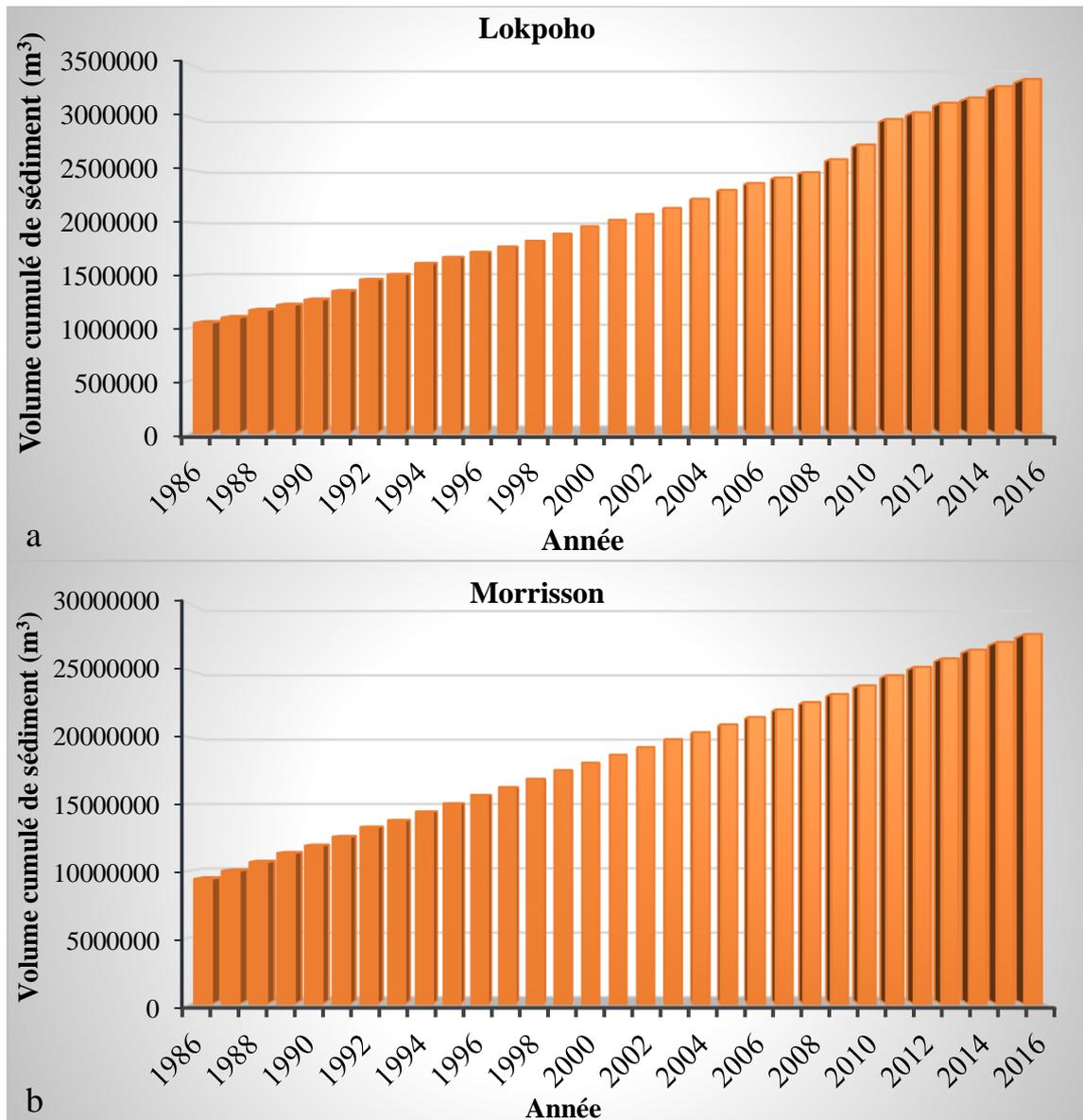


Figure 93 : Évolution du cumul annuel des sédiments dans les retenues Lokpoho (a) et Morrison (a) sur la période 1986-2016

Tableau XLI : Récapitulatif des sédiments entrants dans la retenue Lokpoho et Morrison sur la période 1986-2016

Retenue	Concentration de sédiment piégé dans la retenue		
	Concentration moyenne (mg/L)	Volume moyen (m ³)	Volume accumulé (m ³)
Lokpoho	9,33	74 500	3 356 600
Morrison	15,5	615 700	27 709 800

7.4.3.2. Perte annuelle de la capacité des réservoirs de Lokpoho et Morrisson

L’envasement et l’évaporation des plans d’eau de Lokpoho et Morrisson entraînent des pertes de leur capacité. Ainsi, la figure 94 montre que le barrage Lokpoho et Morrisson perdent en moyenne 0,58 % et 0,77 % de leur volume par an respectivement. Depuis leur création, la retenue de Lokpoho a perdu 36 % de son volume initial et celle de Morrisson a perdu 58 % du volume initial. En considérant la perte annuelle de ces retenues d’eau, leur durée de vie est d’environ 125 ans pour la retenue de Lokpoho et 80 ans pour la retenue de Morrisson à compter de 2024.

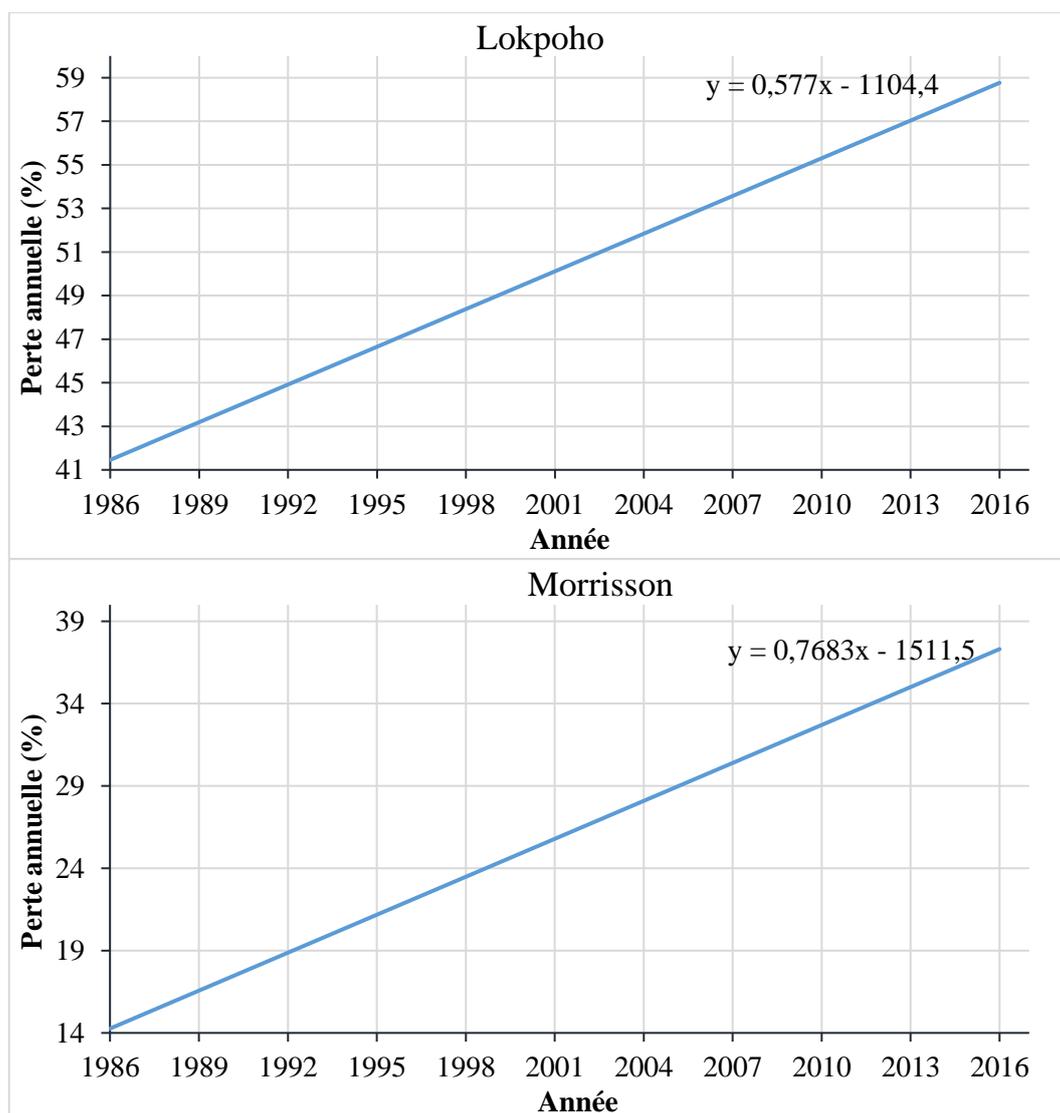


Figure 94 : Perte de la capacité des réservoirs Lokpoho et Morrisson

7.4.4. Bilan hydrologique sur la période 1986-2016

Sur la période 1986-2016, la pluie moyenne annuelle observée est de 1143 mm. De cette pluie, une hauteur de 124 mm ruisselle et une hauteur de 248 mm s’infiltré dans le sol. Une part de

l'infiltration (21 mm) alimente les nappes souterraines. Cette figure montre également que l'ETR moyenne sur le bassin versant est de 771 mm (Figure 95).

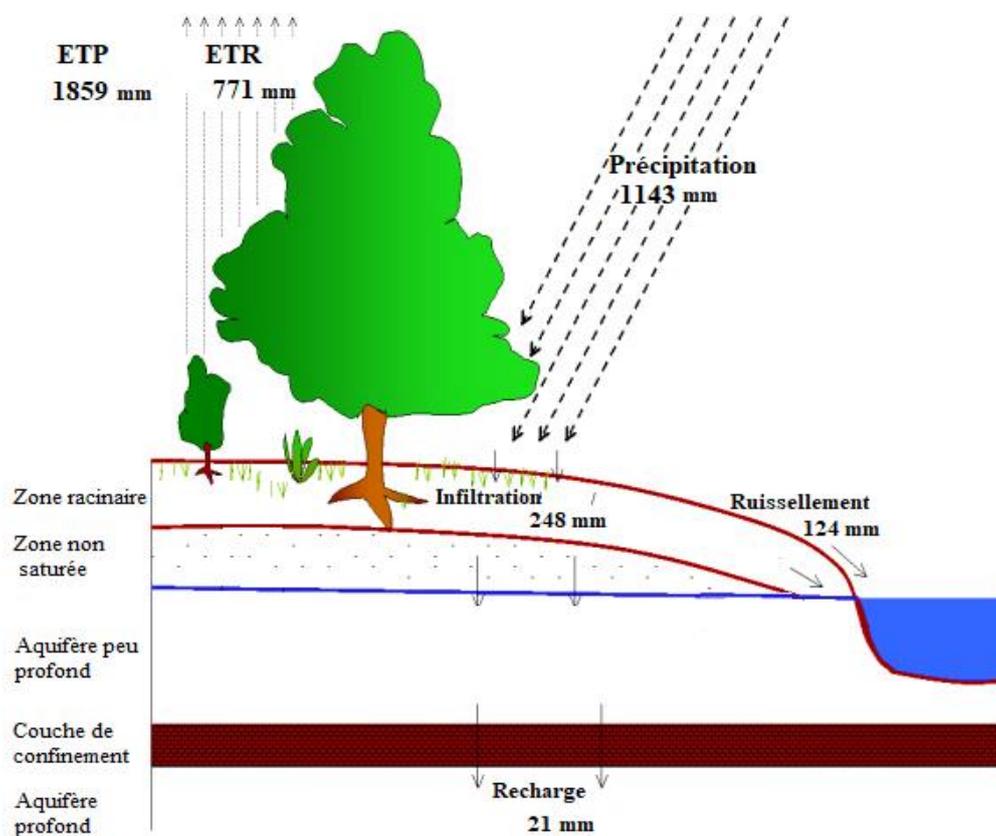


Figure 95 : Bilan hydrologique sur la période 1986-2016

7.4.5. Impact combiné des changements climatiques et de la dynamique d'occupation des sols sur les écoulements

7.4.5.1. Évolution des débits à l'exutoire du bassin versant

La figure 96 montre l'impact de la dynamique d'occupation des sols et des changements climatiques observés sur les débits à l'exutoire du BVHKBK. Selon les modèles étudiés, la dynamique d'occupation des sols et les changements climatiques entraîneront en générale une diminution des débits à l'exutoire du bassin versant selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 des modèles CanESM2 et CCLM4. Cependant, le scénario RCP8.5 du modèle RCA4 montre une hausse des débits à l'exutoire du bassin versant.

En moyenne, les modèles régionaux climatiques étudiés montrent une baisse des débits de 11,27 % selon le scénario RCP4.5 et une réduction des débits de 16,75 % selon le scénario RCP 8.5 sur la période 2021-2050.

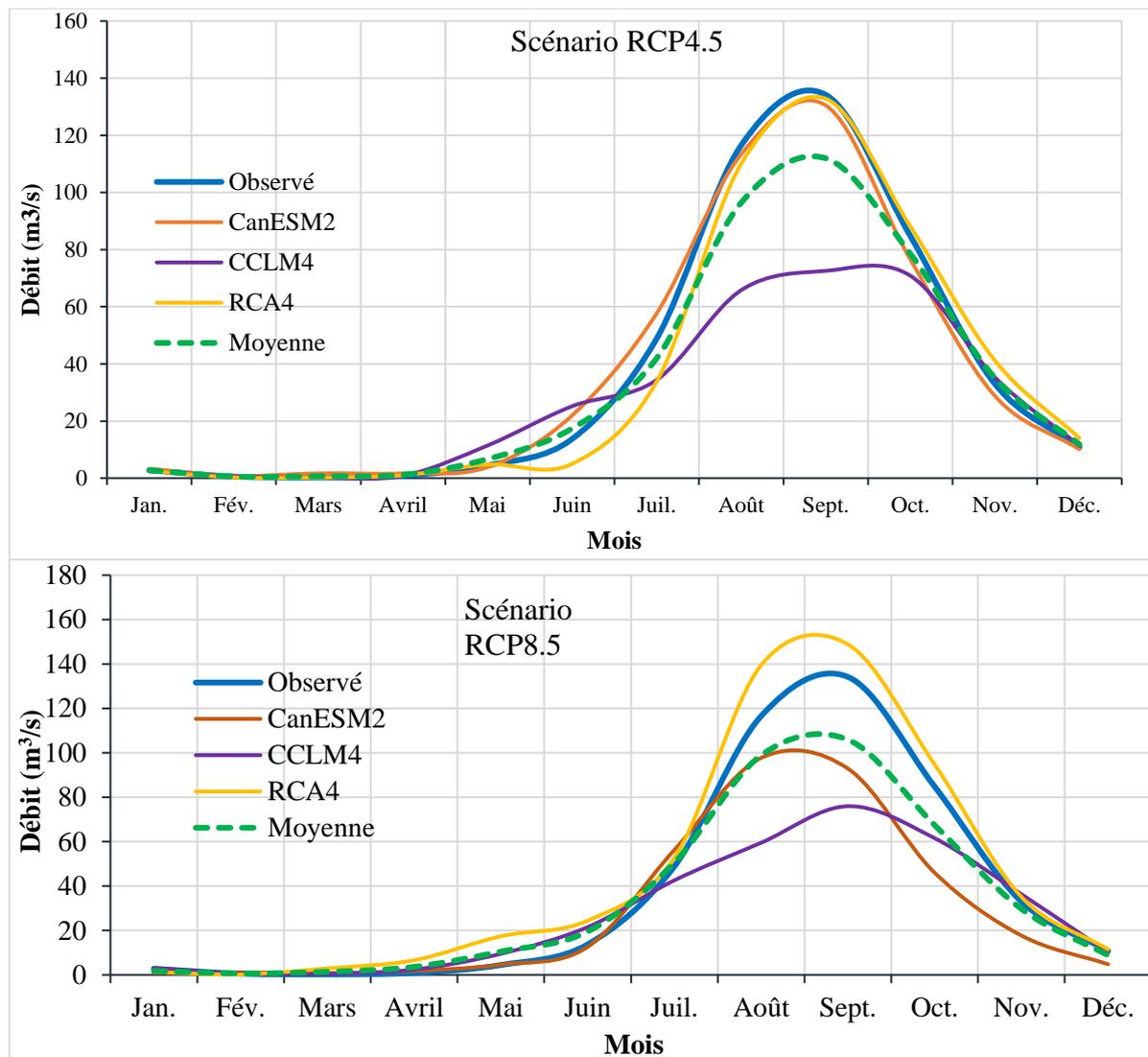


Figure 96 : Évolution des débits à l'exutoire du bassin versant sur la période 2021-2050

7.4.5.2. Évolution temporelle des paramètres du bilan hydrologique

La figure 97 montre l'évolution décennale des paramètres du bilan hydrologique selon les modèles climatiques étudiés. Comme exemple, les pluies moyennes annuelles (P) sur la décennie 2021-2030 passent de 737,36 mm à 922,30 mm sur la décennie 2031-2040 et chute à la valeur de 887,98 mm sur la décennie 2041-2050 selon le modèle CanESM2. Cette évolution est la même pour les autres paramètres que sont l'ETR, le ruissellement (Q) et l'infiltration (I) simulés. Le scénario RCP8.5 montre une évolution continue dans l'ensemble des paramètres du bilan hydrologique sur le bassin versant. Les pluies moyennes annuelles sur la décennie 2021-2030 passent de 880,68 mm à 757,02 mm sur la décennie 2031-2040 et atteint la valeur de 729,20 mm sur la décennie 2041-2050 selon le modèle CanESM2. Ce dynamisme de la baisse des pluies est également observé au niveau des autres paramètres (ETR, Q et I) du bilan

hydrologique simulés excepté le modèle RCA4 RCP8.5 qui montre une légère hausse des paramètres sur la décennie 2041-2050.

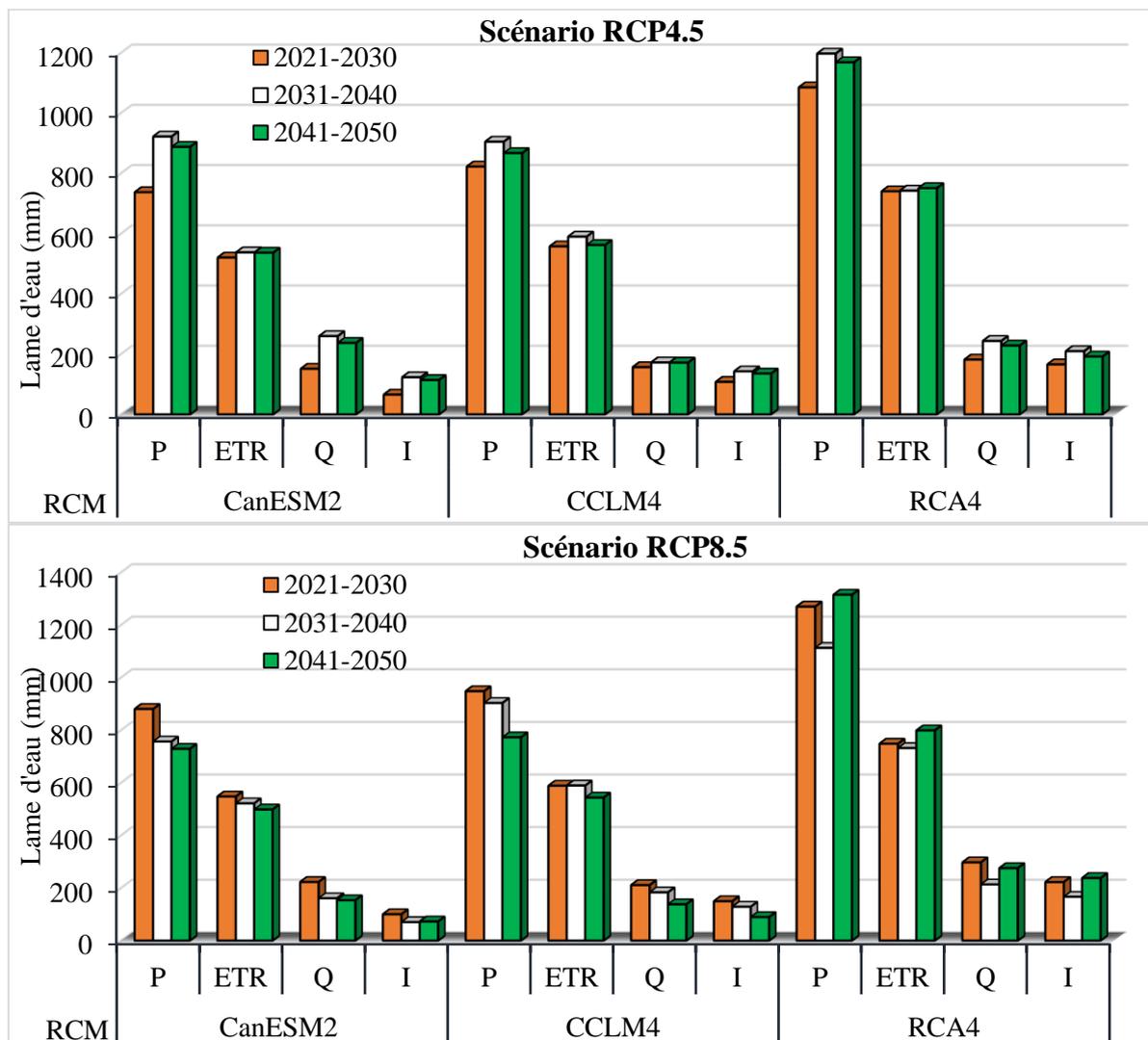


Figure 97 : Évolution temporelle des paramètres du bilan hydrologique selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

7.4.5.3. Évolution spatiale des ressources en eau sur la période 2021-2050

- Analyse de la répartition spatiale des ressources en eau selon le modèle RCA4

Le ruissellement moyen annuel selon le modèle RCA4 (Figure 98) se ressent beaucoup plus dans les sous-bassins 26, 30, 31 et 42 (au Sud) avec des intensités allant de 235 à 283 mm par an selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.

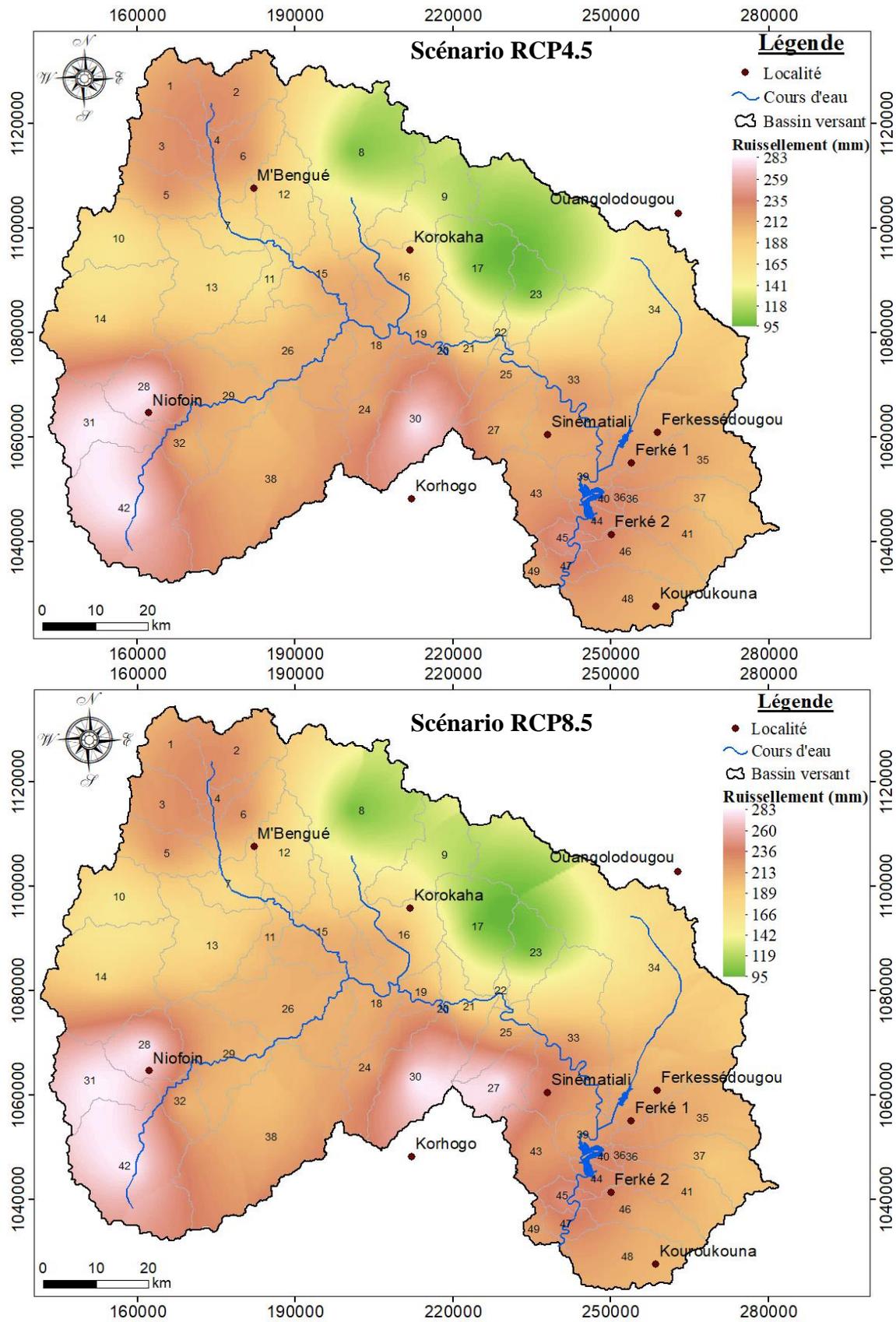


Figure 98 : Carte de distribution spatiale de lame d'eau écoulee sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

L'ETR selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 du modèle RCA4, est plus intense à l'Ouest et au Sud du bassin versant. Les zones les plus concernées par de fortes valeurs de l'ETR sont les sous-bassins versants 7, 12, 13 et 37 avec des valeurs allant de 746 à 769 mm (Figure 99).

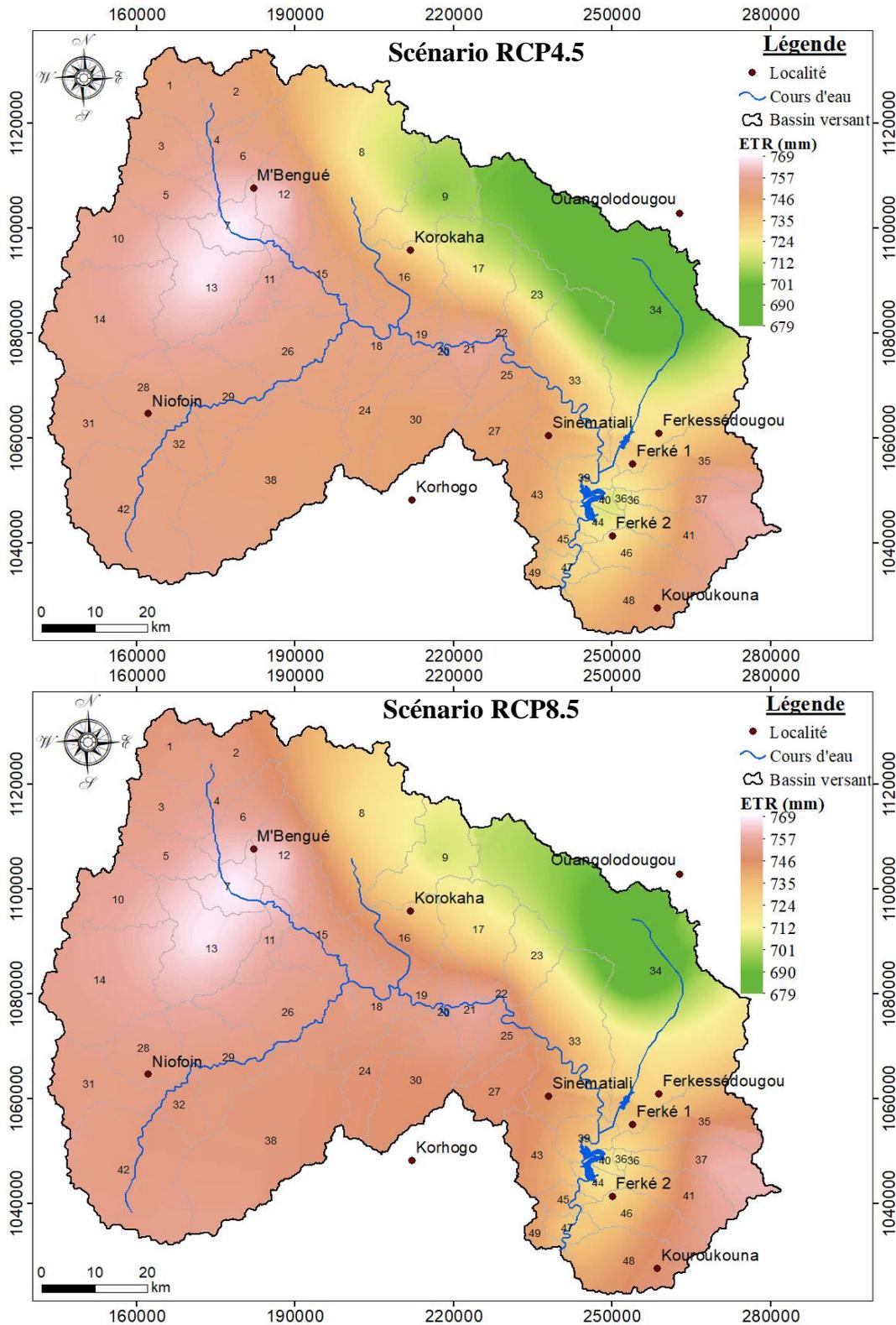


Figure 99 : Carte de distribution spatiale de l'ETR sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

Le modèle RCA4 montre que l'infiltration moyenne annuelle est plus élevée dans les sous-bassins 1 à 6, 28, 31, 32 et 42 (Figure 100) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec des valeurs allant de 221 à 260 mm.

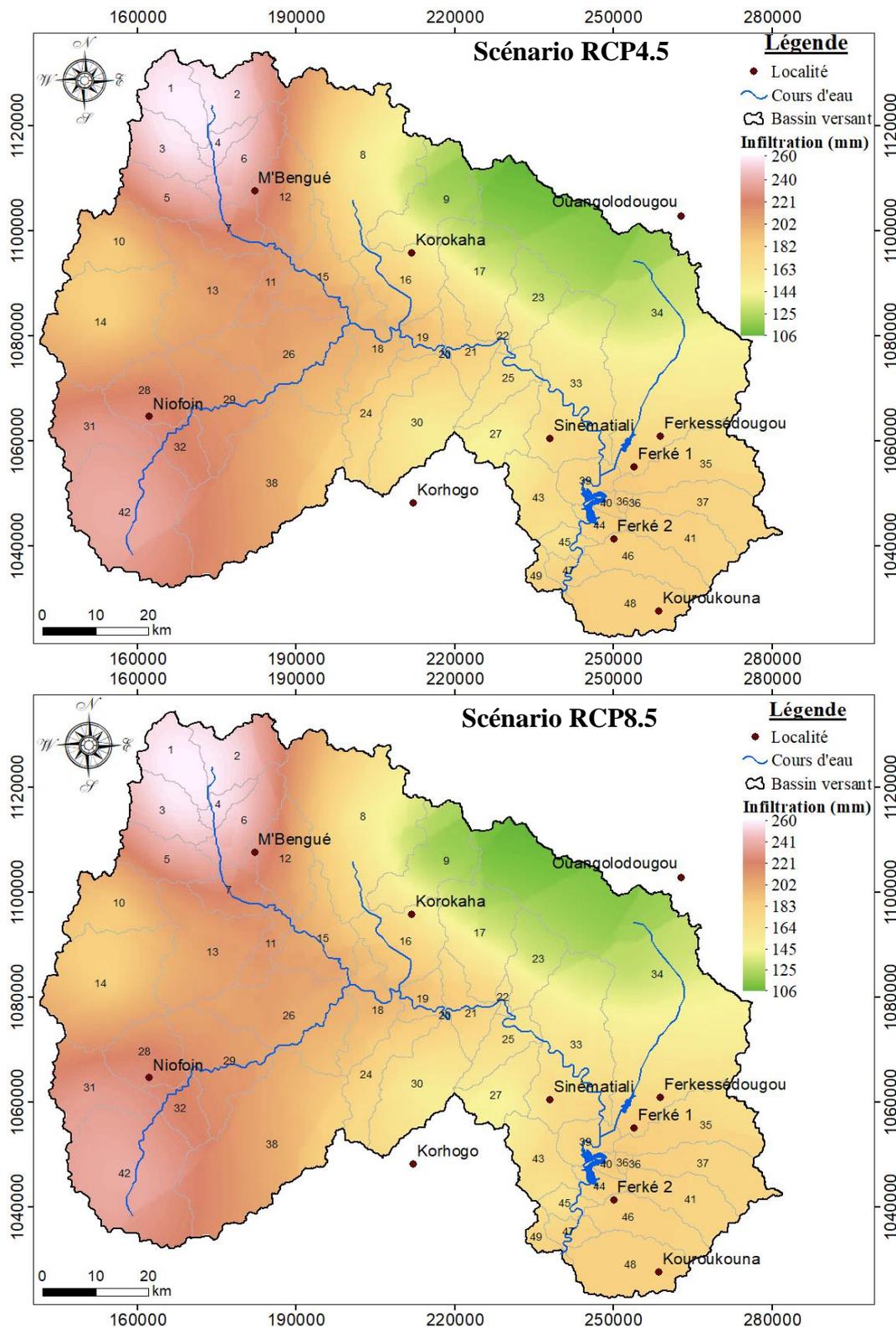


Figure 100 : Carte de distribution spatiale de l'infiltration sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

La recharge moyenne annuelle est plus faible dans les sous-bassins 9, 23, 27, 43 33 et 34 (Figure 101) selon le scénario RCP4.5. Les zones de fortes recharges concernent tout l'ouest du bassin versant avec des valeurs de recharges allant de 6,1 à 8,4 mm et de 6,6 à 8 mm respectivement pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

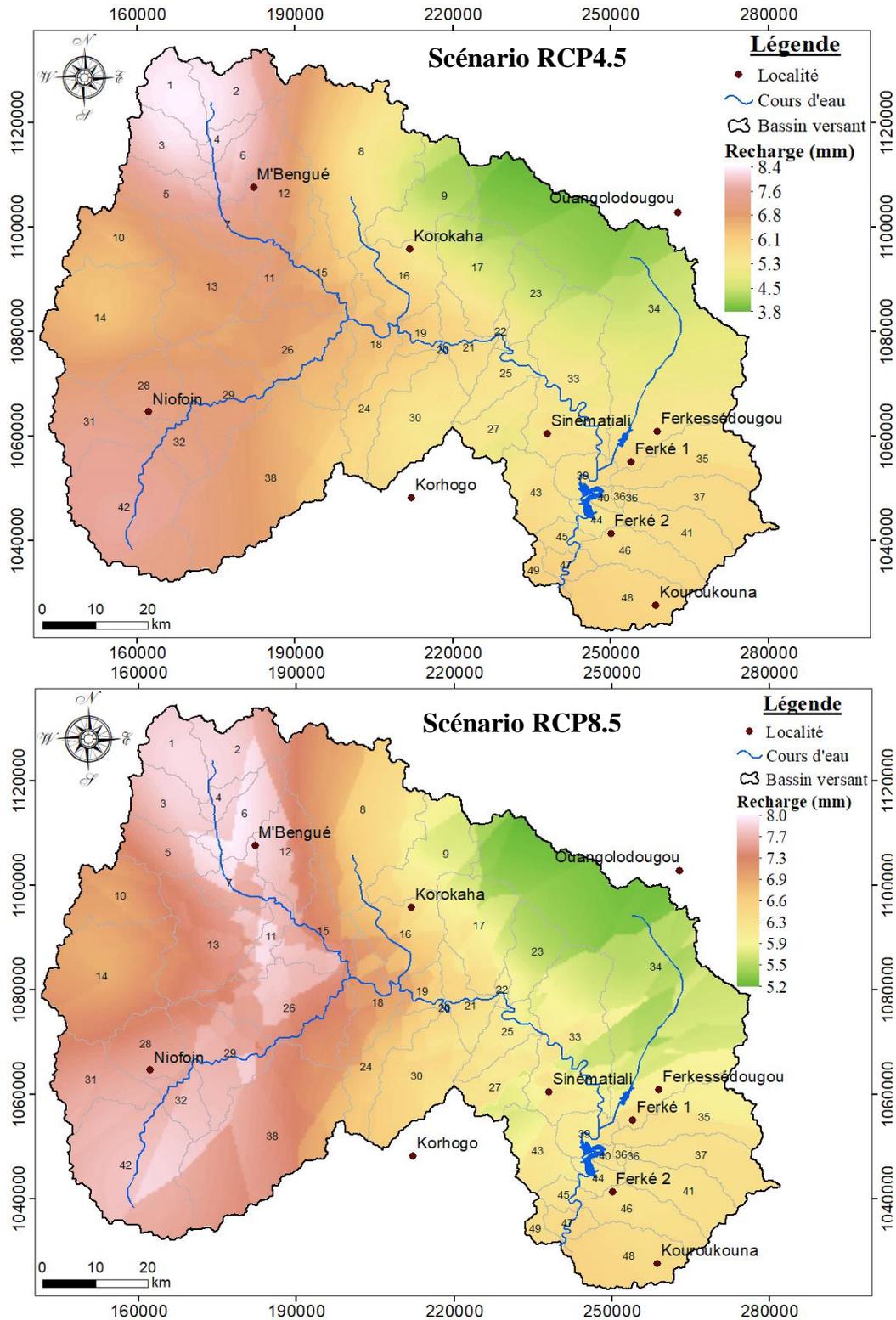


Figure 101 : Carte de distribution spatiale de la recharge sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

- **Analyse de la répartition spatiale des ressources en eau selon le modèle CanESM2**

Le ruissellement est élevé au Sud et au Sud-est du bassin versant avec des hauteurs d'eau comprises entre 239 et 270 mm selon le scénario RCP4.5 (Figure 102). Cependant, il est faible avec le scénario RCP8.5 avec des valeurs allant de 204 à 241 mm vers le sud-ouest.

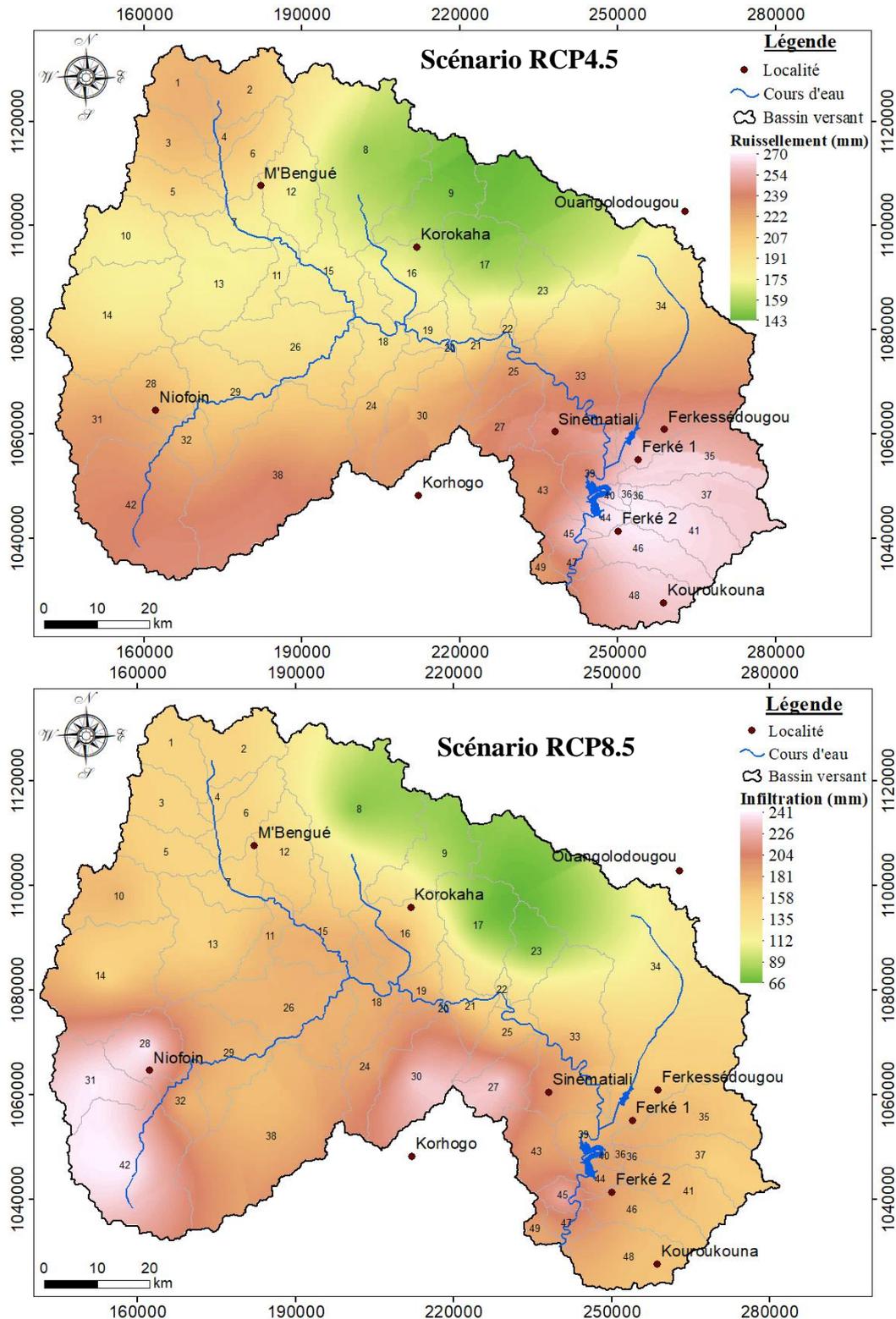


Figure 102 : Carte de distribution spatiale de la lame d'eau moyenne annuelle infiltrée sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

Selon le modèle CanESM2, l'ETR moyenne annuelle varie de 410 à 564 mm pour le scénario RCP 4.5 et de 411 à 558 mm selon le scénario RCP8.5 (Figure 103). L'ETR est plus intense dans les sous-bassins 1 à 13 et les sous-bassins 21, 22, 28, 31, 35, 37, 41, 46 et 48 selon les scénarios RCP4.5 et RCP 8.5.

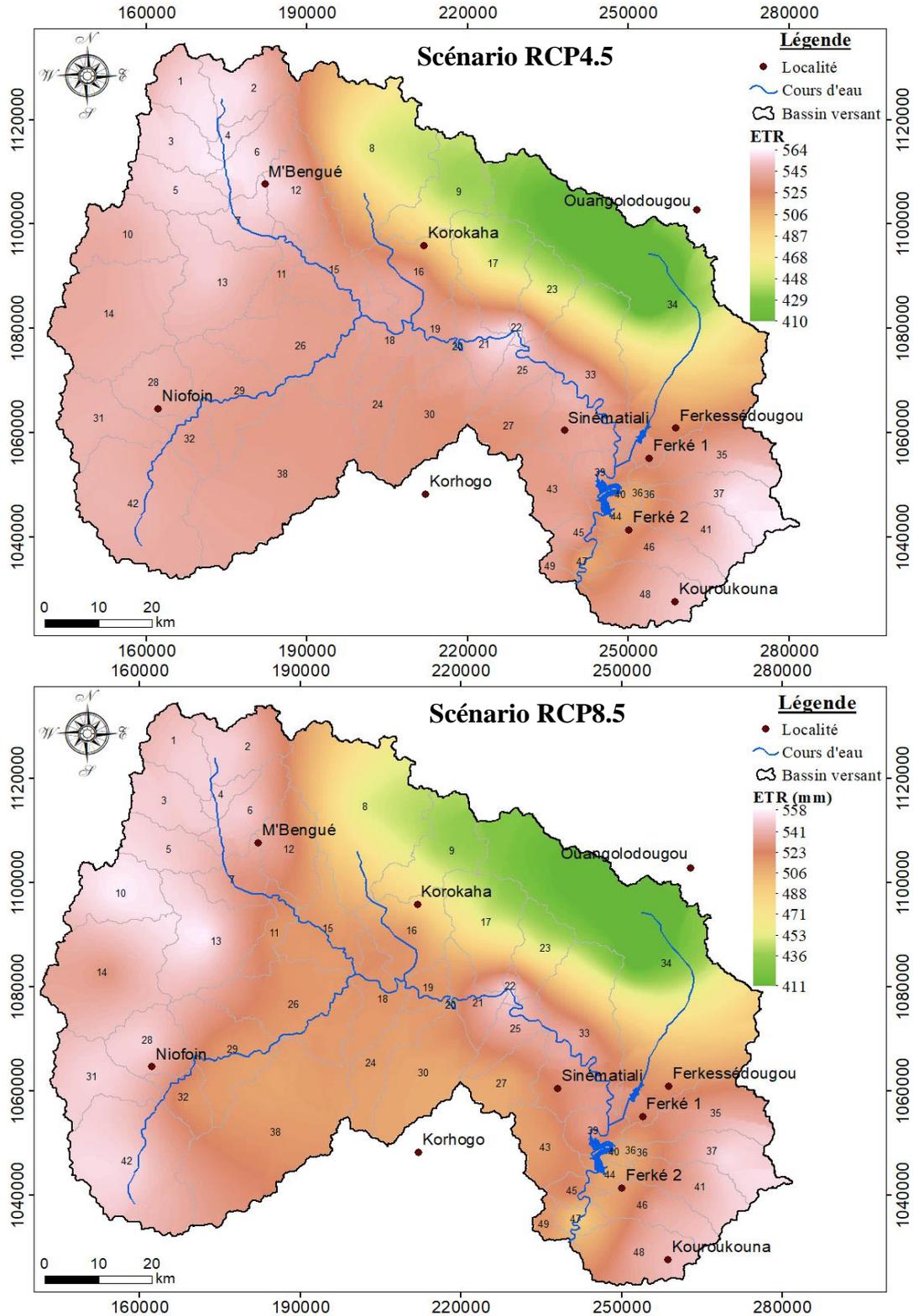


Figure 103 : Carte de distribution spatiale de l'ETR moyenne annuelle sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

L'infiltration moyenne annuelle est plus élevée dans les sous-bassins 1 à 6 (Figure 104) selon le scénario RCP4.5 (avec des valeurs allant de 125 à 164 mm). En plus de ces sous-bassins, selon le scénario RCP8.5, les sous-bassins 28, 31 et 42 connaissent des infiltrations élevées.

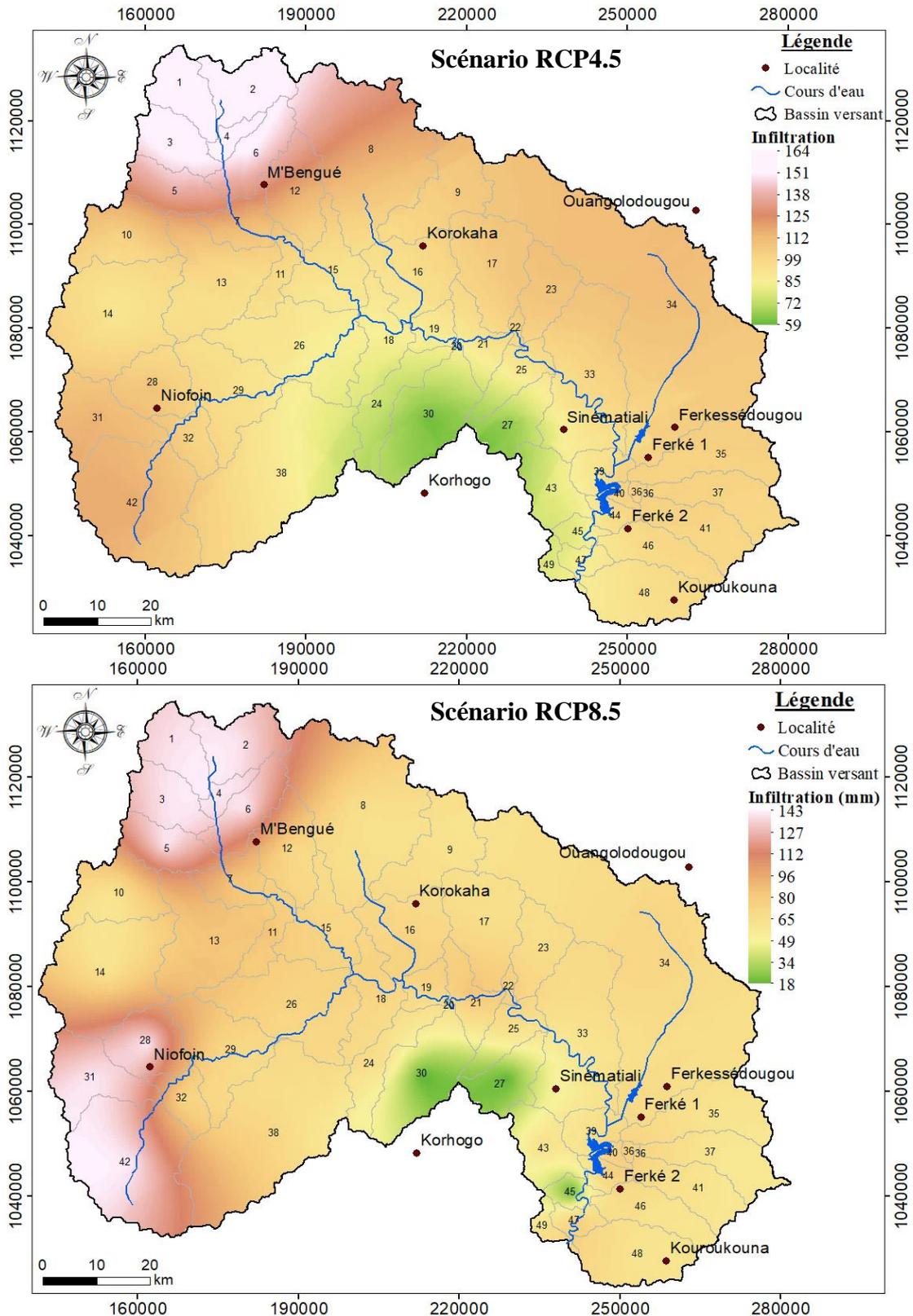


Figure 104 : Carte de distribution spatiale de l'infiltration sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

La recharge moyenne annuelle selon la Figure 105, est plus faible dans les sous-bassins 24, 27, 30 et 43 (Figure 105) selon le scénario RCP4.5 (avec des valeurs allant de 1,9 à 2,5 mm). En plus de ces sous-bassins, selon le scénario RCP8.5, le sous-bassin 44 est également concerné.

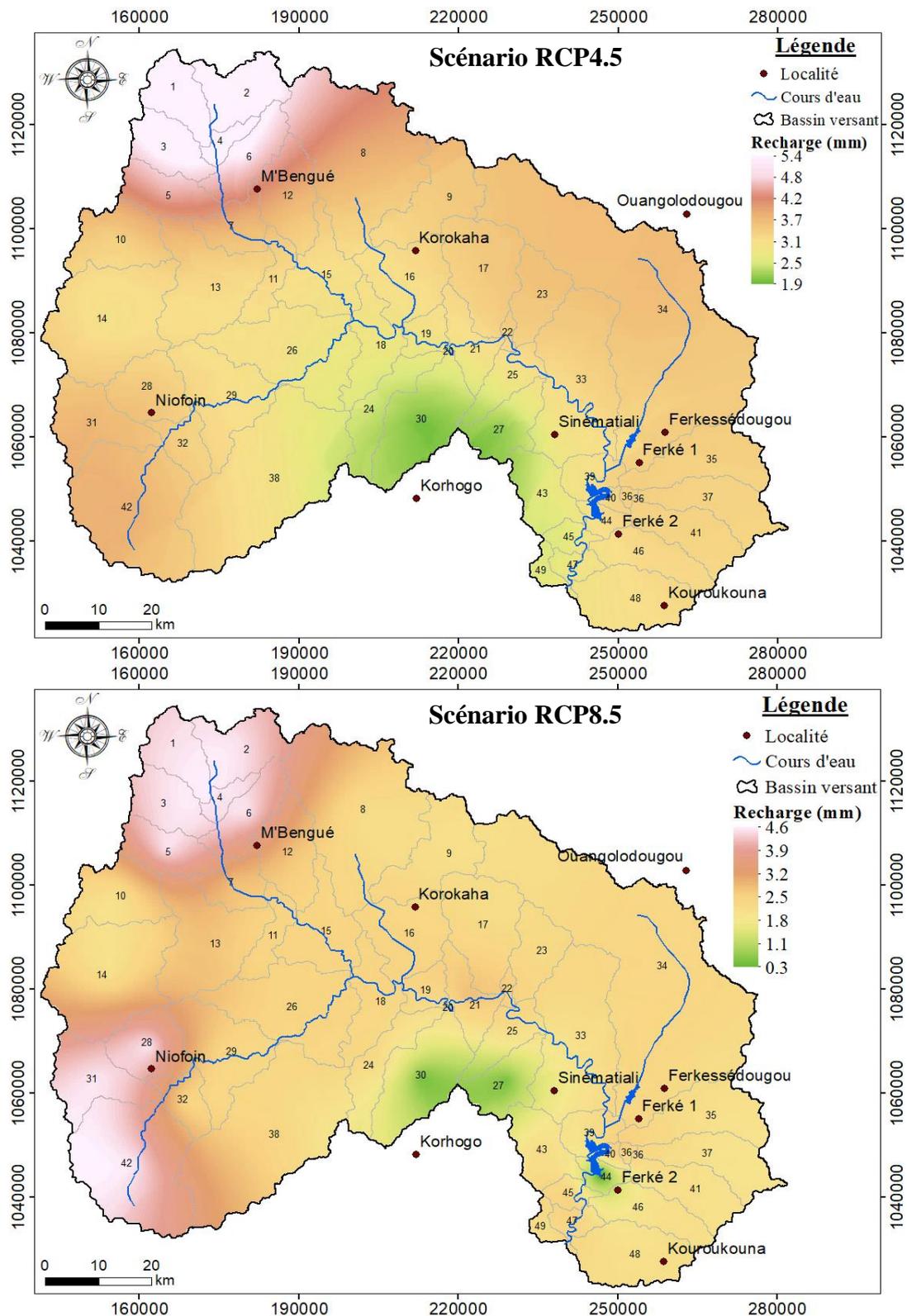


Figure 105 : Distribution spatiale de la recharge des nappes souterraine sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

- Analyse de la répartition spatiale des ressources en eau selon le modèle CCLM4

La figure 106 montre la répartition spatiale du ruissellement moyen annuel sur le BVHKBK selon le modèle CCLM4. Les écoulements de surface sont élevés dans les sous-bassins versants 10, 14, 27, 30 et 45 avec des hauteurs d'eau ruisselées allant de 189 à 273 mm et de 208 à 288 mm respectivement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

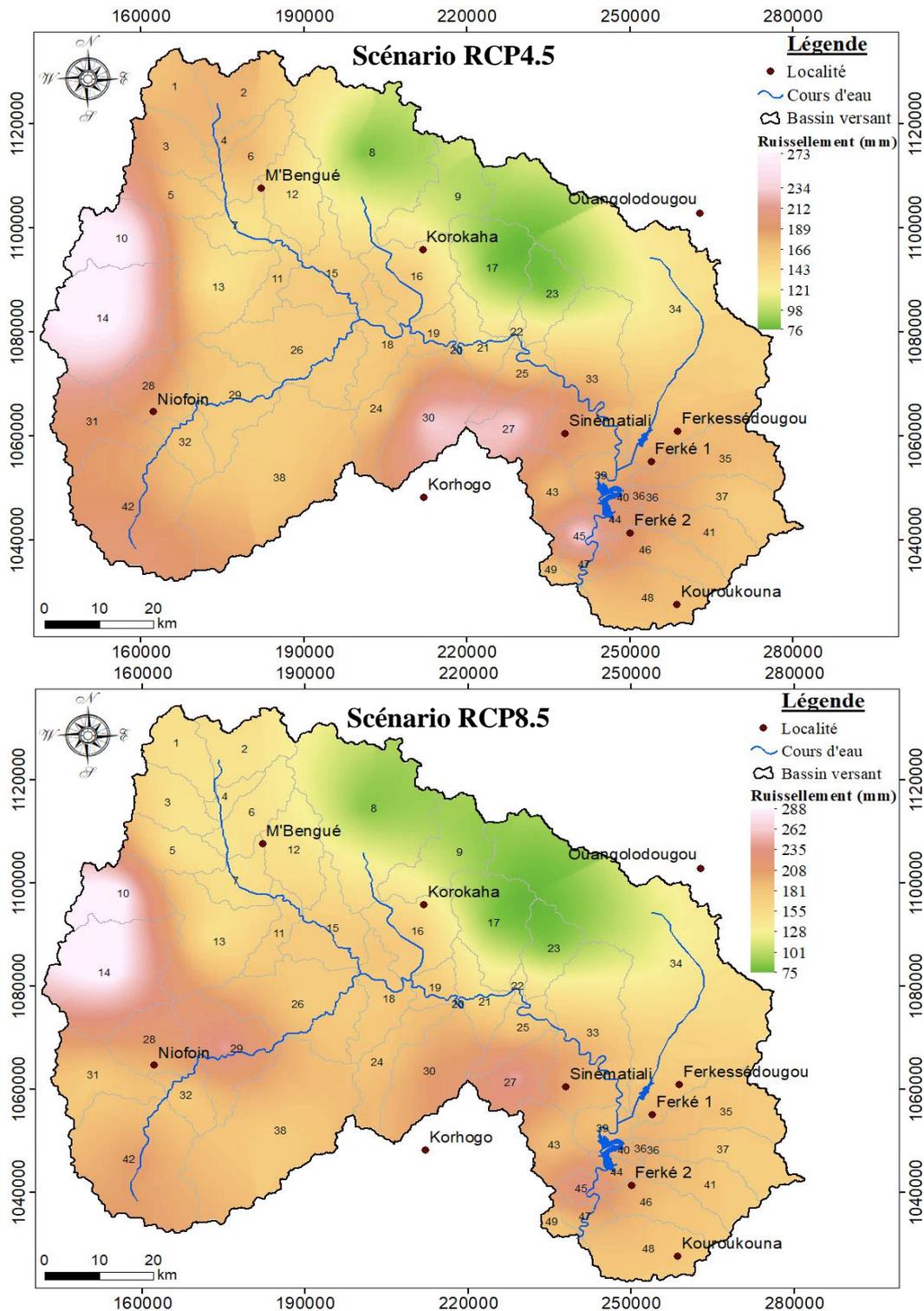


Figure 106 : Carte de distribution spatiale de la lame d'eau écoulée sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

Selon le modèle CCLM4, l'ETR moyenne annuelle varie de 432 à 615 mm pour le scénario RCP 4.5 et de 437 à 606 mm selon le scénario RCP8.5 (Figure 107). L'ETR est plus intense sur l'ensemble du bassin versant exceptés les sous-bassins versants 8, 9, 17, 23, 33, 34, 36, 40 et 44 quel que soit le scénario étudié.

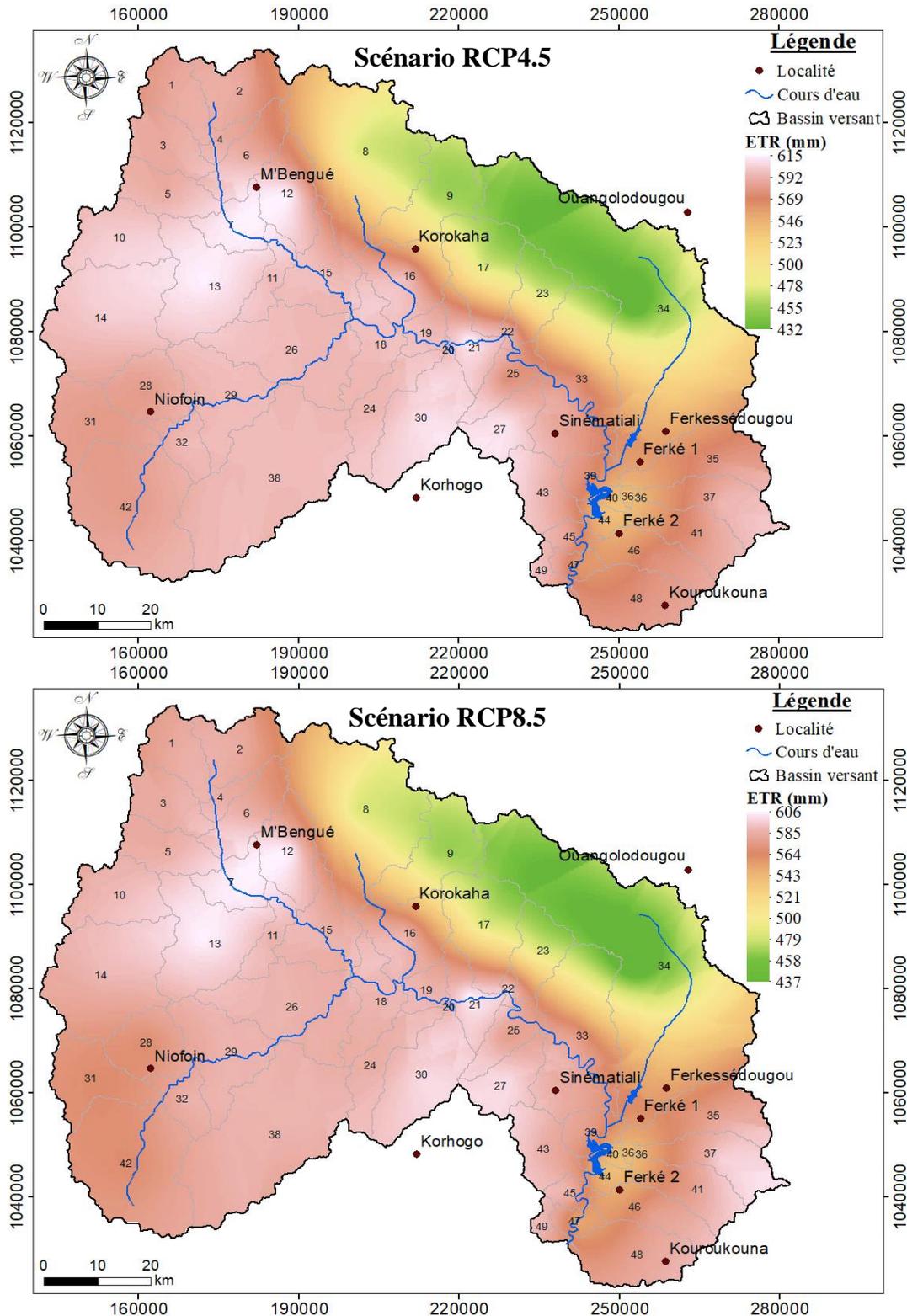


Figure 107 : Carte de distribution spatiale de l'ETR sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

Le modèle CCLM4 montre que l'infiltration moyenne annuelle est plus élevée dans les sous-bassins 1 à 6, 28, 31 et 42 (Figure 108) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec des valeurs allant de 167 à 197 mm et de 150 à 174 mm respectivement.

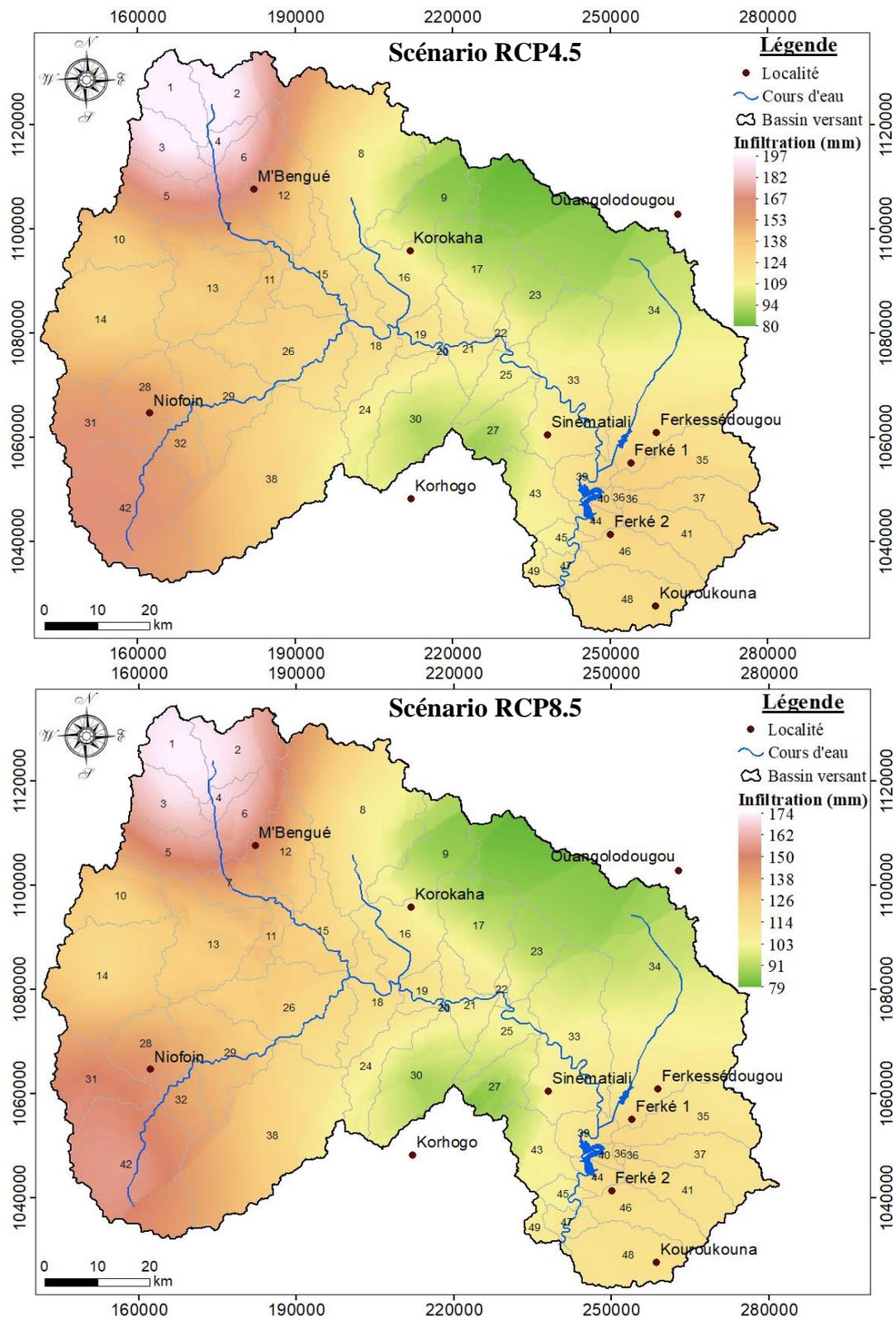


Figure 108 : Carte de distribution spatiale de l'infiltration sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

La recharge moyenne annuelle simulée par le modèle CCLM4 est répartie dans l'espace tout comme l'infiltration moyenne annuelle. Elle est plus élevée dans les sous-bassins 1 à 6, 28, 31 et 42 (Figure 109) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec des valeurs allant de 5,2 à 6,4 mm et de 4,6 à 5,7 mm respectivement.

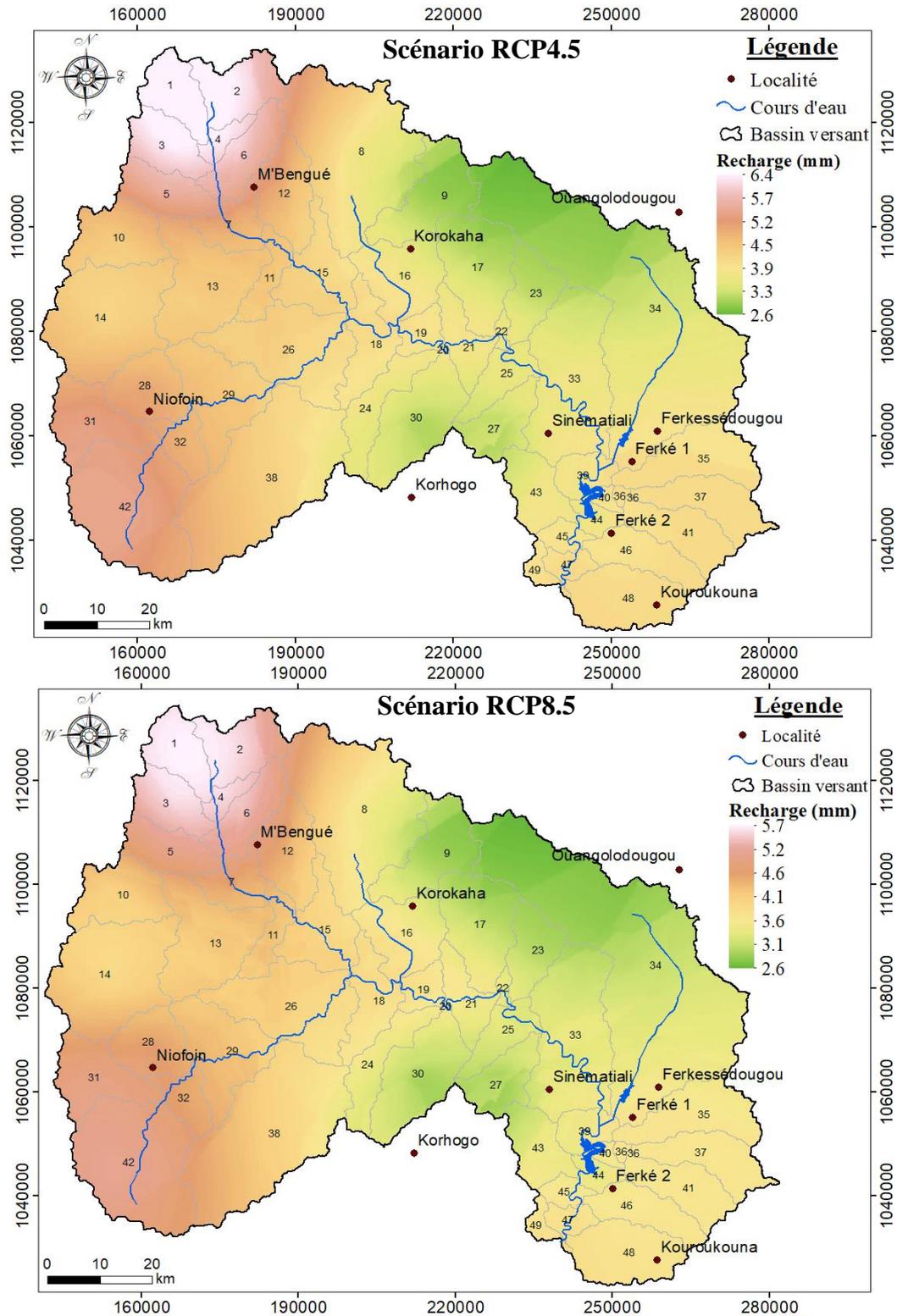


Figure 109 : Carte de distribution spatiale de la recharge sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5

7.5. Analyse de la propagation des crues du fleuve Bandama dans les complexes sucriers de Ferkessédougou

7.5.1. Calage du modèle hydraulique HEC-CRAS

La figure 110, montre l'évolution des débits simulés et observés lors du calage du modèle HEC-RAS. Cette figure montre que le modèle reproduit bien les conditions du milieu. La performance du modèle se traduit par un coefficient de corrélation de 97 % et un coefficient de Nash de 68 % avec une erreur moyenne sur les simulations de 0,19 %. Cette forte corrélation montre également que le modèle reproduit bien les conditions hydrodynamiques du milieu.

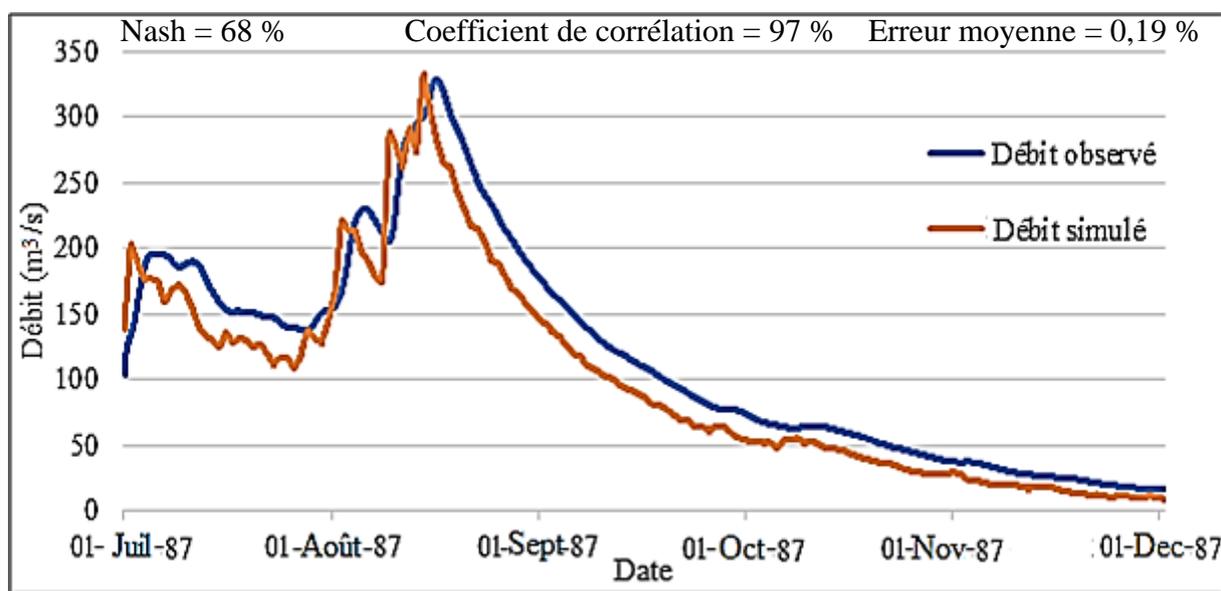


Figure 110 : Hydrogrammes des débits observés et des débits simulés du 01 juillet au 31 décembre 1987 à la station hydrométrique Route Korhogo-Badikaha

7.5.2. Validation du modèle hydraulique HEC-CRAS

Les débits historiques du 01 juillet au 31 décembre 1981 utilisés pour la validation du modèle montrent un bon synchronisme entre les débits simulés et observés (Figure 111). Cela se confirme par l'allure des courbes de variation de débits simulés et mesurés. Les différents tests numériques effectués sur les valeurs mesurées et observées montrent une bonne corrélation de ces valeurs. Cette bonne corrélation se traduit par un coefficient de corrélation de 92 % et un coefficient de Nash de 63 % avec une erreur moyenne de 2,5 %. Les résultats numériques et graphiques montrent que le modèle reproduit bien les débits du cours d'eau.

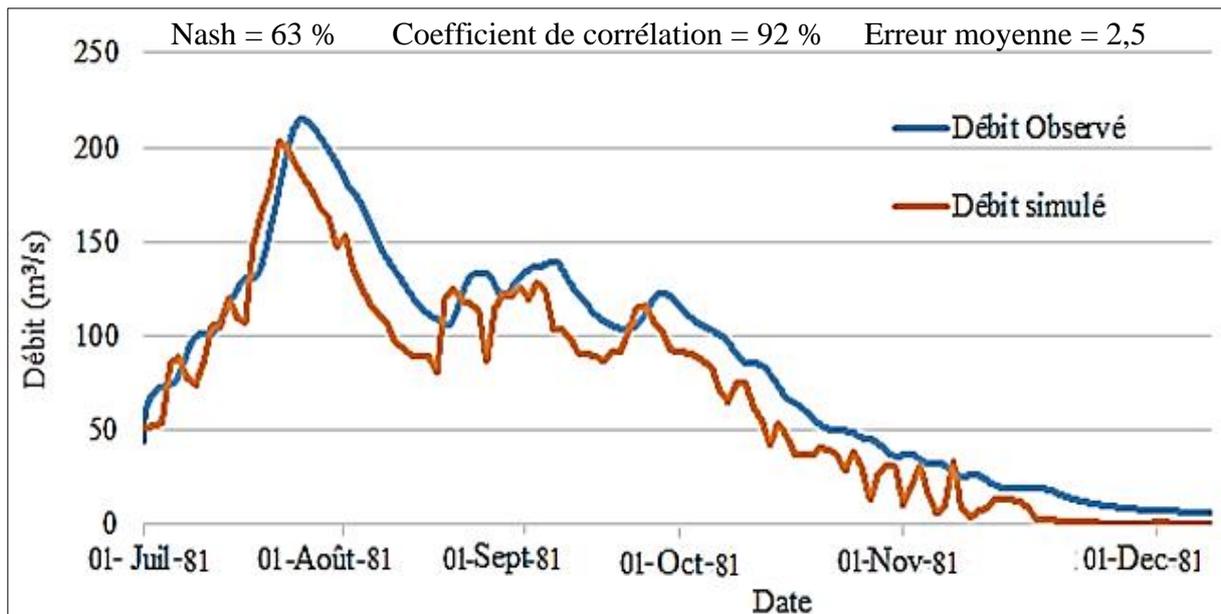


Figure 111 : Hydrogrammes des débits observés et des débits simulés du 01 juillet au 31 décembre 1981 à la station hydrométrique Route Korhogo-Badikaha

7.5.3. Modélisation des inondations provoquées par des pluies extrêmes

La figure 112 présente la spatialisation des écoulements pour 5 jours consécutifs de précipitation. Sur cette figure, les 5 jours de pluies simulées (d'intensité cumulée environ 164,7 mm) engendrent des écoulements dans les bras morts et les affluents du fleuve Bandama et également dans des parcelles de canne à sucre du complexe sucrier de Ferkessédougou. Les cotes de terrain atteintes par les hauteurs d'eau sont comprises entre 285 et 381,01 m. En effet, la superficie inondée dans les périmètres de la SUCAF-CI pendant les 5 jours consécutifs de pluie d'intensité cumulées de 164,7 mm est d'environ 528 ha.

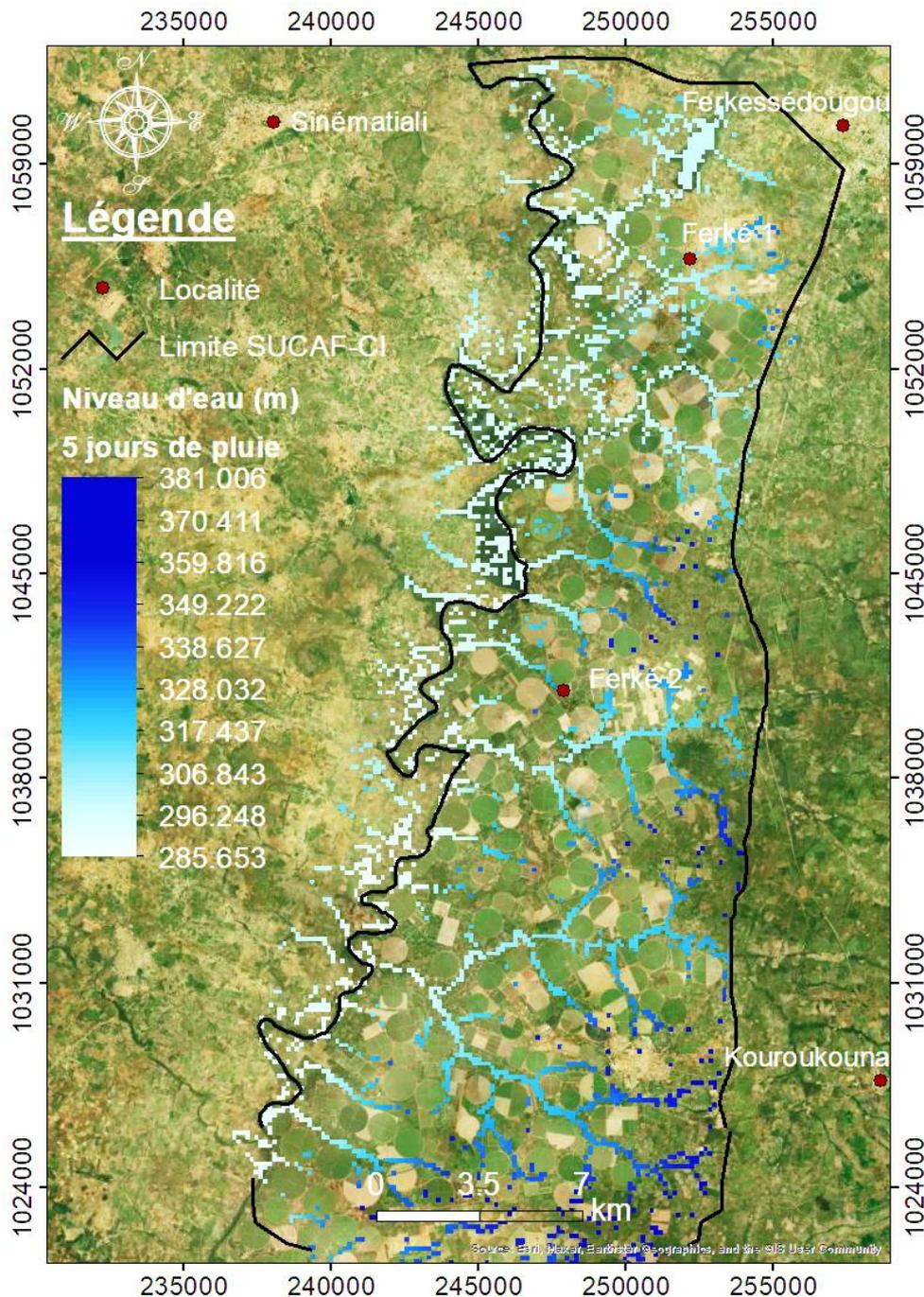


Figure 112 : Spatialisation des écoulements après une pluie de période de période retour 5 ans au cours de la période 1986-2016

La figure 113 montre les surfaces inondées par une pluie de 10 jours consécutifs (d'intensité environ 154,1 mm) de précipitation sur les complexes sucriers de Ferkessedougou. Cette précipitation pourrait provoquer des écoulements sur des parcelles et les hauteurs d'eau peuvent atteindre des cotes allant jusqu'à 382,02 m. La superficie des terres qui pourrait être inondées est de 1 759 ha pendant les 10 jours consécutives de pluies.

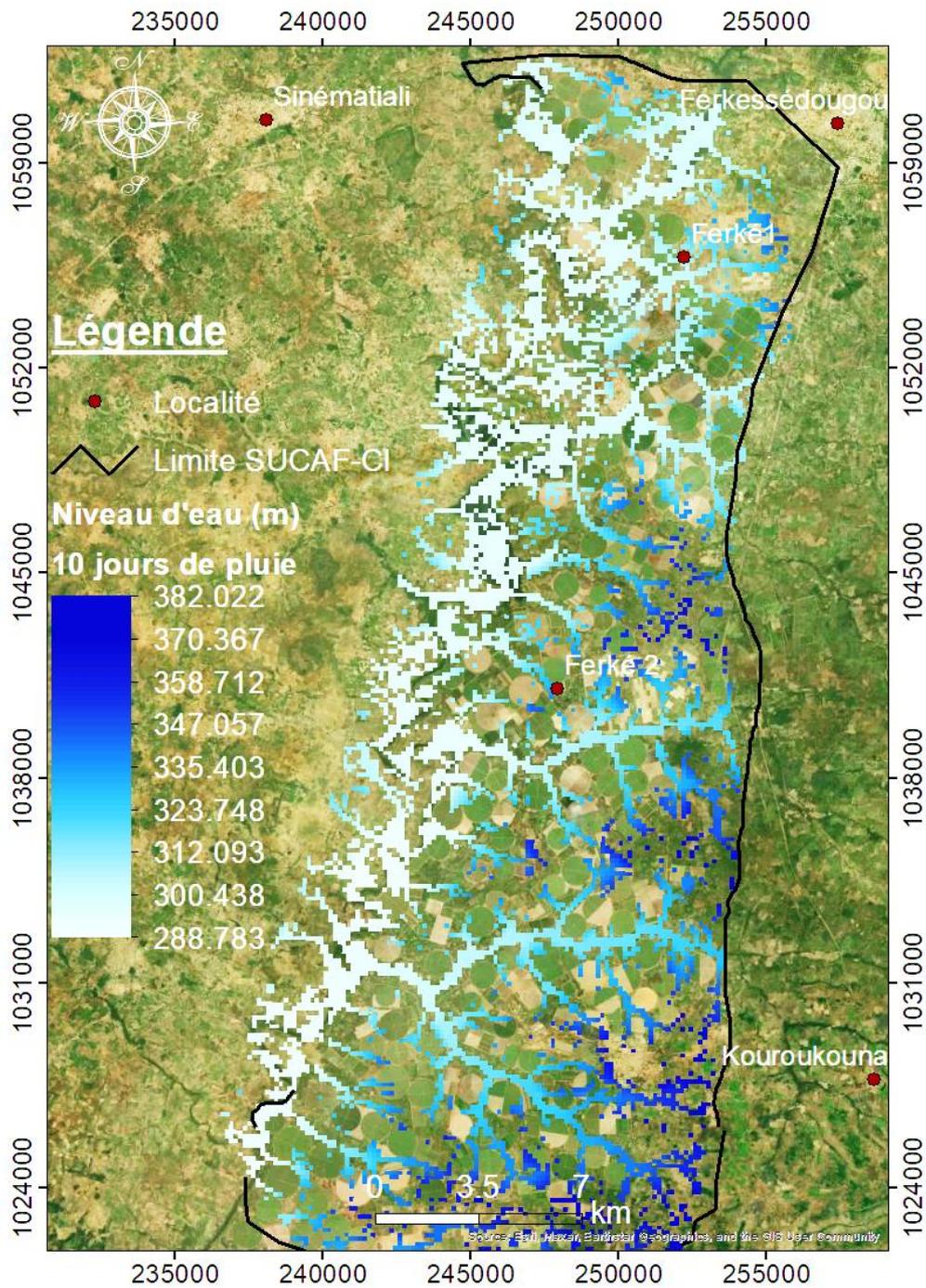


Figure 113 : Spatialisation des écoulements après une pluie de 10 jours consécutifs issu de la période 1986-2016

7.5.4. Modélisation à différentes périodes de retour des crues du fleuve Bandama dans les complexes sucriers de Ferkessédougou

7.5.4.1. Analyse des quantiles de crue

La figure 114 montre les résultats du critère de comparaison graphique de l'ajustement de la loi de GEV (GEV), Gumbel (EV1, A), Weibull (W2) et de la loi Normale (N). Il en résulte que la loi de Gumbel présente l'avantage d'être un modèle simple de l'écoulement des fleuves dont les valeurs des débits journaliers annuels sont bien corrélées à ladite loi. Elle met en évidence un bon ajustement comparé aux lois Weibull, GEV et la loi Normale.

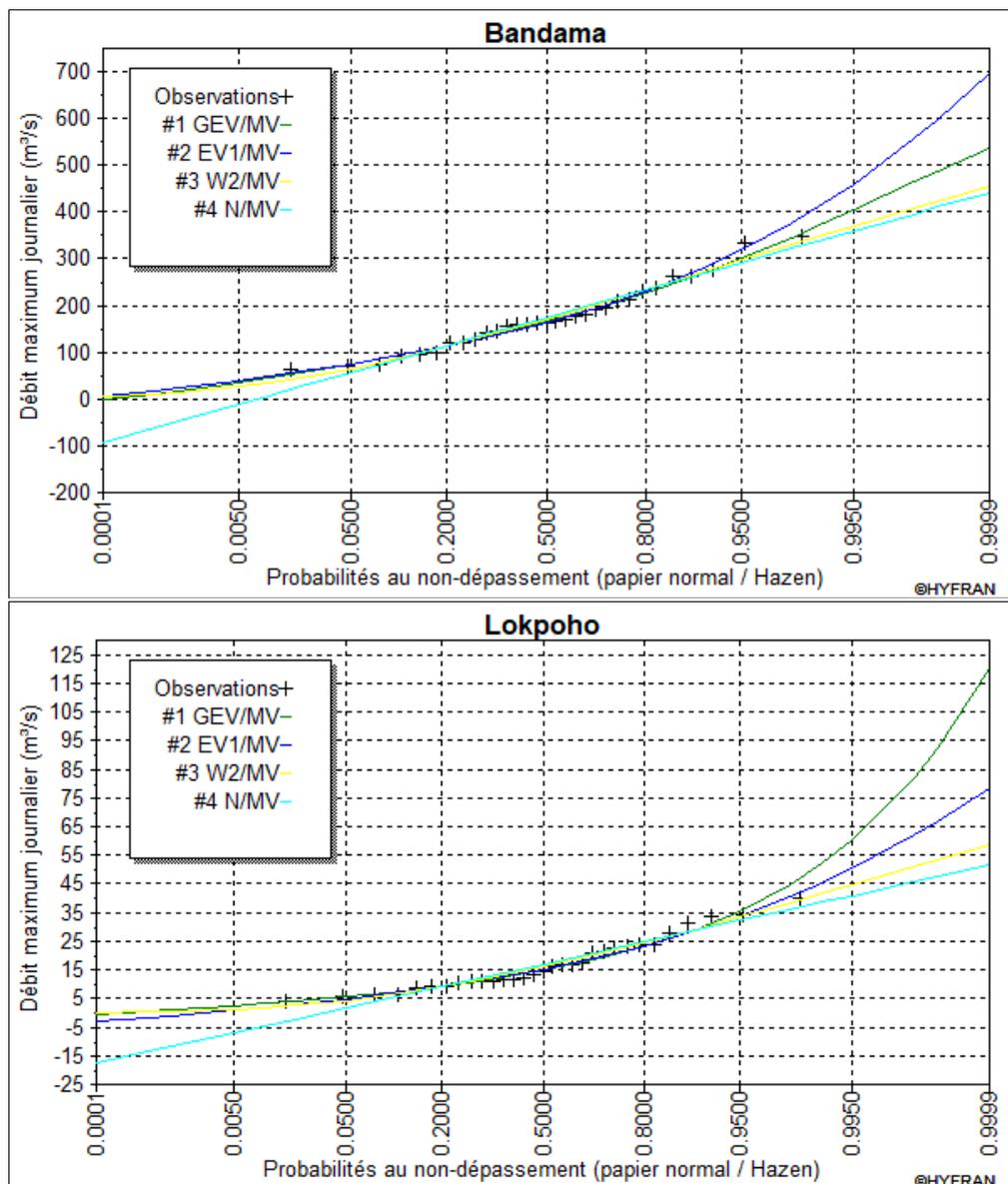


Figure 114 : Comparaison graphique des lois mises en jeu

Le tableau XLII et tableau XLIII présentent le classement des lois ajustées aux séries de débits moyens journaliers. D’après les critères de comparaison, c’est la loi de Gumbel qui s’ajuste bien aux modules du fleuve Bandama et de la rivière Lokpoho. Ensuite, viens la loi de Weibull, suivie de la loi Normale et enfin la loi de GEV (loi Généralisée des Valeurs Extrêmes).

Ainsi, les critères d’information Akaike et Bayésien (AIC et BIC) permettent de retenir la loi de Gumbel sur les deux cours d’eau. Cette loi est arrivée en tête parmi toutes les lois mises en compétition avec la plus grande probabilité à posteriori ($P(Mi/X) = 43$ et les plus faibles valeurs de critères de AIC et BIC qui sont de 356 et 353 pour le Bandama Blanc, 226 et 223 pour Lokpoho.

Tableau XLII : Comparaison statistique des lois d'ajustement des modules du fleuve Bandama à la station hydrométrique de Badikaha

Modèle	Nombre de paramètres	Bandama				
		XT	P(Mi)	P(Mi/x)	BIC	AIC
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	417	25	43	356	353
Weibull (Maximum de vraisemblance)	2	349	25	34	356	354
Normale (Maximum de vraisemblance)	2	341	25	14	358	355
GEV (Maximum de vraisemblance)	3	375	25	9	359	355

Tableau XLIII : Comparaison statistique des lois d'ajustement des modules du fleuve Lokpoho à la station hydrométrique de Ferké-Sinématiali

Modèle	Nombre de paramètres	Lokpoho				
		XT	P(Mi)	P(Mi/x)	BIC	AIC
Gumbel (Maximum de vraisemblance)	2	45	25	45	226	223
Weibull (Maximum de vraisemblance)	2	42	25	42	226	224
Normale (Maximum de vraisemblance)	3	52	25	10	229	225
GEV (Maximum de vraisemblance)	2	39	25	3	232	229

7.5.4.2. Quantiles de crue du fleuve Bandama à Badikaha et Lokpoho à différentes périodes de retour

Les quantiles de crue des fleuves Lokpoho et Bandama Blanc pour diverses périodes de retour sont consignés dans le tableau XLIV. On observe une variation importante des débits estimés par la loi de Gumbel pour les périodes de retour de 2 , 10 , 50 et 100 ans avec des débits respectifs de 15 , 28,7 , 41 et 45,4 m³/s pour la rivière Lokpoho et de 162, 276, 375 et 417 pour le fleuve Bandama.

Tableau XLIV : Débits pour différentes périodes de retour

Période de retour (an)	Débit Lokpoho (m³/s)	Débit Bandama (m³/s)
100	45,4	417
50	41	375
10	28,7	276
2	15	162

7.5.5. Dynamique des écoulements à différentes périodes de retour dans les périmètres sucriers de Ferkessédougou

7.5.5.1. Propagation des crues de période de retour 2 ans

Les figures 115, 116, 117 et 118 présentent les cotes atteintes par la propagation des crues du Bandama au niveau des complexes sucriers de Ferkessédougou respectivement à des périodes de retour de 2, 10, 50 et 100 ans.

La simulation des crues dans les complexes sucriers de Ferkessédougou a montré que :

- pour une période de retour de 2 ans, les cotes atteintes par l'eau vont de 292,9 m à environ 299,03 m et une superficie des complexes sucriers estimée à environ 546,8 ha est inondée (Figure 115) ;
- pour une période de retour de 10 ans, les cotes atteintes par l'eau vont de 293,53 m à environ 299,54 m et une superficie des complexes sucriers estimé à environ 708 ha est inondée (Figure 116) ;
- pour une période de retour de 50 ans, les cotes atteintes par l'eau varient de 293,91 à 300,04 m. Cette crue inonde 729 ha des complexes sucriers (Figure 117).
- les crues de période de retour de 100 ans inondent les parcelles en dessous des cotes 300,07 m. La superficie des complexes sucriers inondée par cette propagation des crues s'élève à environ 757,2 ha (Figure 118).

Les parcelles inondées concernent celles situées le long du fleuve et proche des affluents. Les deux unités de production Ferké 1 et Ferké 2 ne sont pas impactées par la propagation des crues.

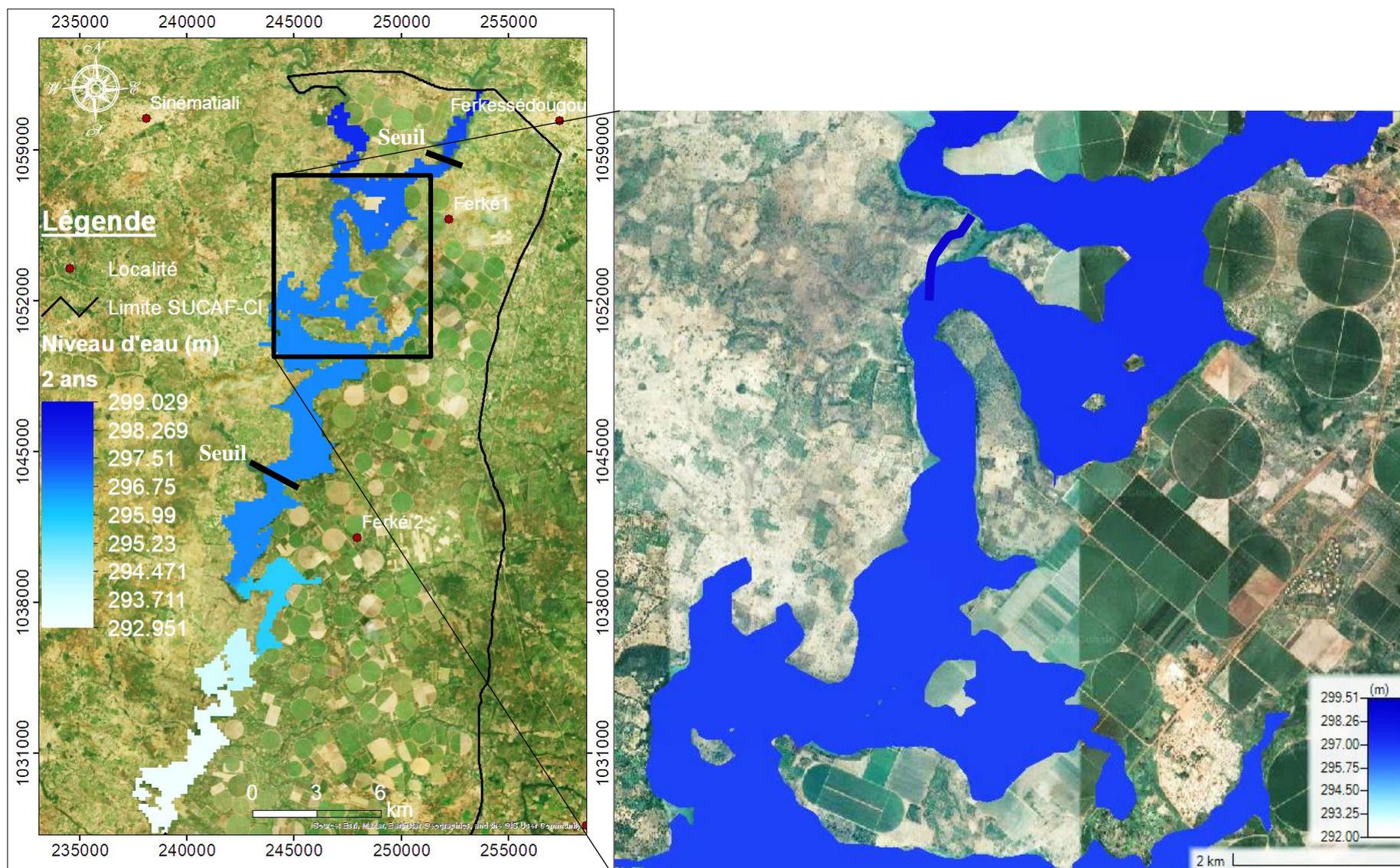


Figure 115 : Spatialisation d'une crue de période de retour de 2 ans

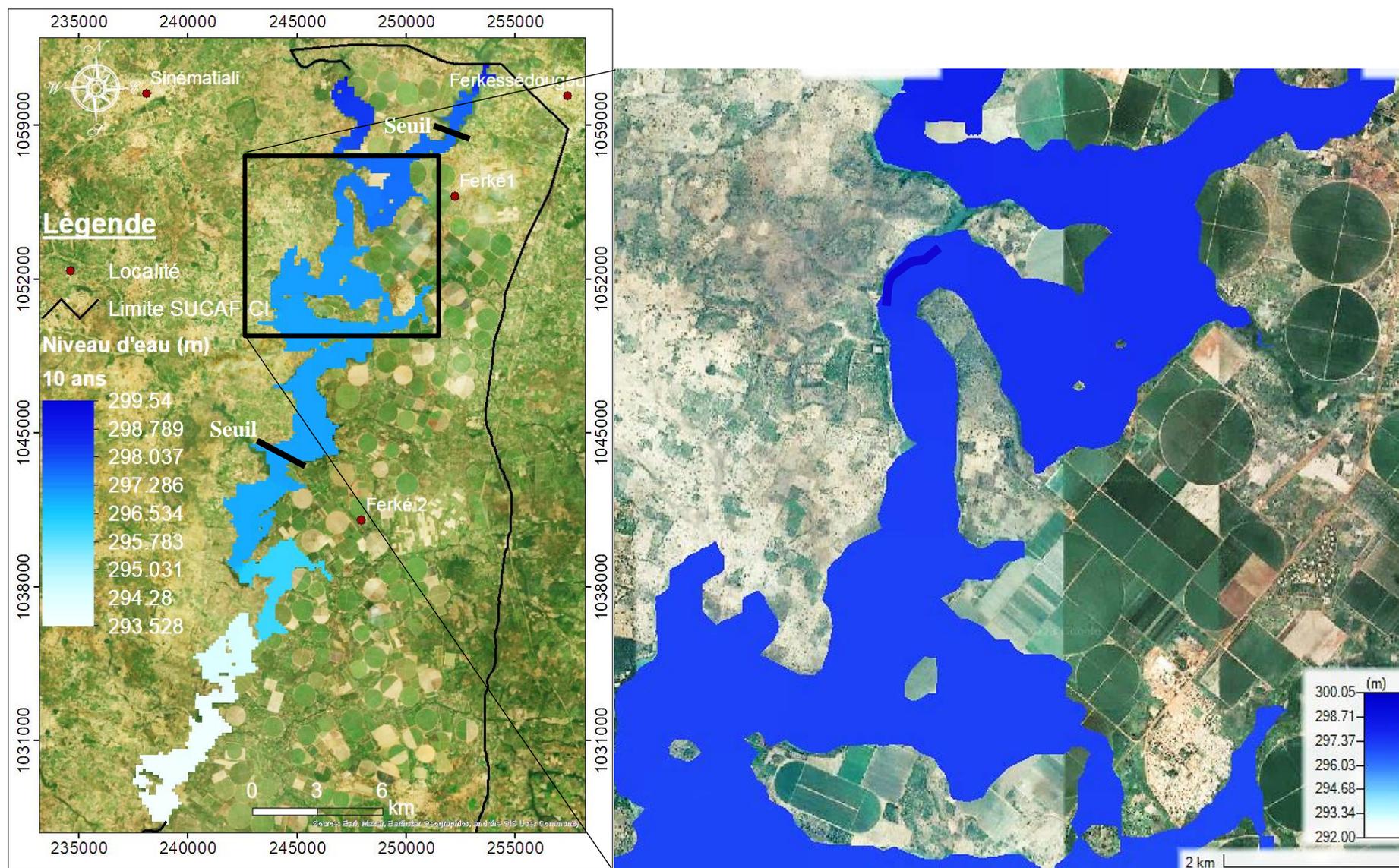


Figure 116 : Spatialisation d'une crue de période de retour de 10 ans

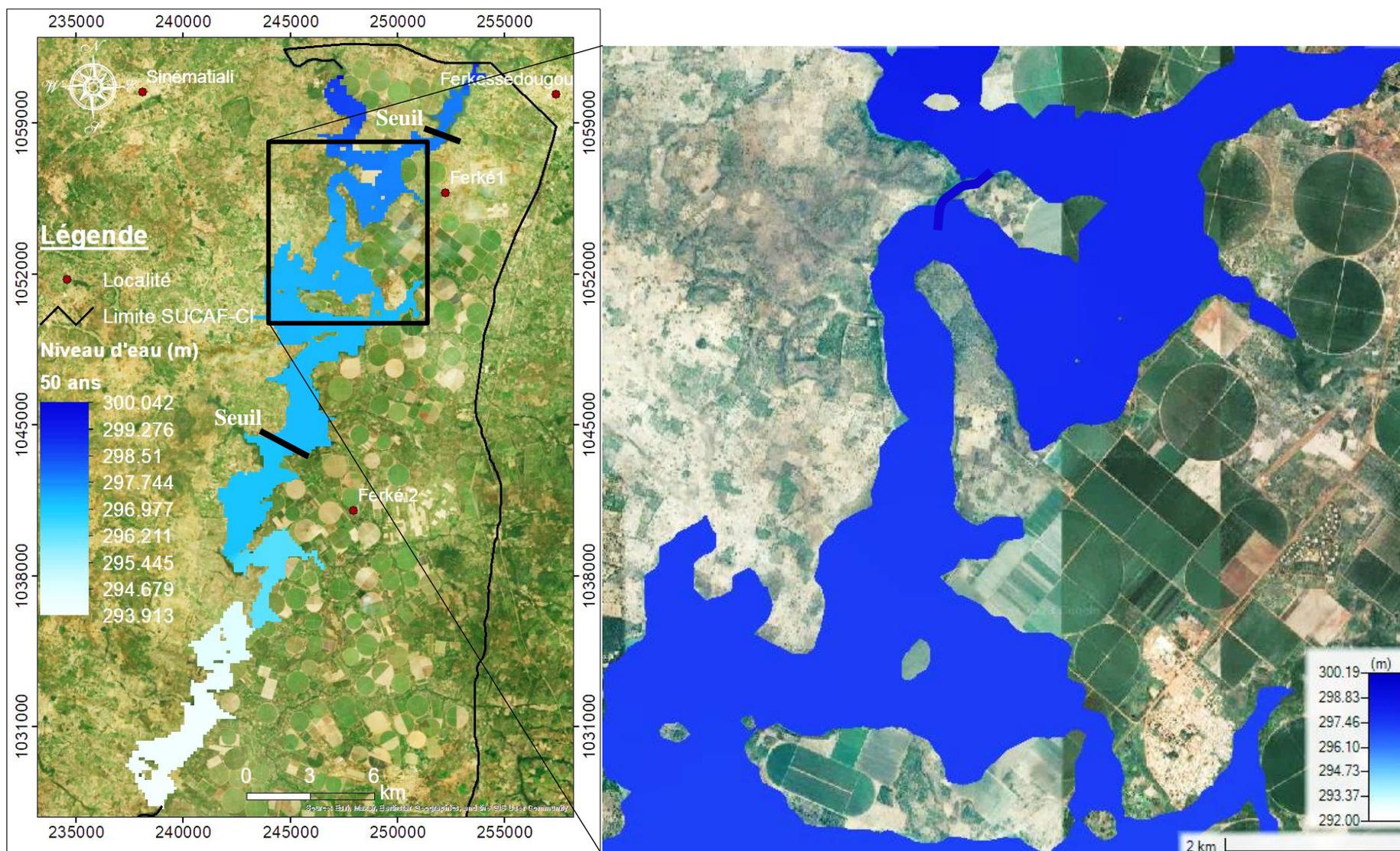


Figure 117 : Spatialisation d'une crue de période de retour de 50 ans

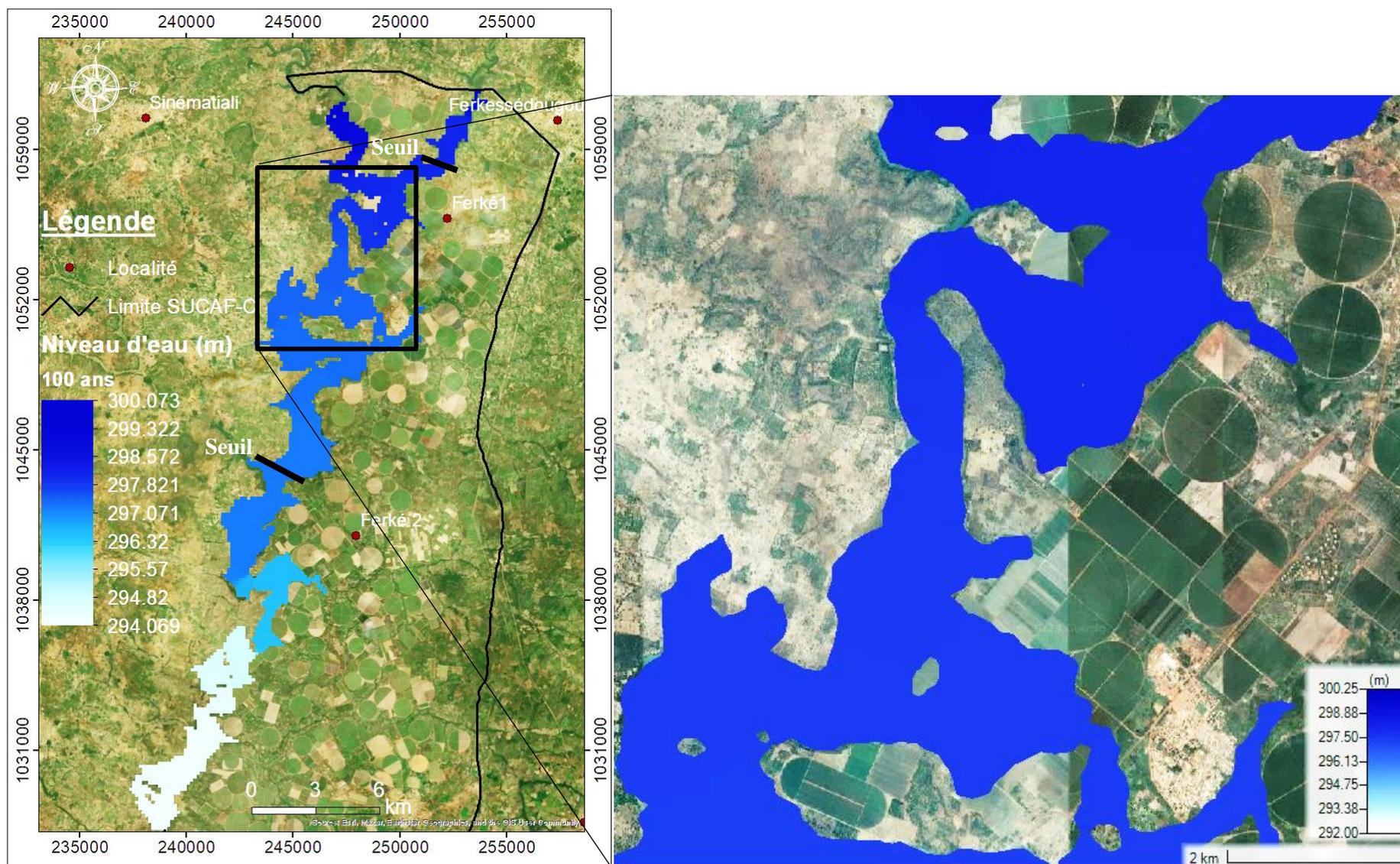


Figure 118 : Spatialisation d'une crue de période de retour 100 ans

7.6. Discussion

Le Bassin versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha (BVHBKB) délimité par le modèle agro-hydrologique SWAT a une superficie d'environ 9 688 km² avec 49 sous bassins et 49 URH. L'analyse de sensibilité effectuée dans le module SUFI2 de SWAT-CUP a permis d'observer 5 paramètres très sensibles aux écoulements. Parmi ces paramètres, on a le paramètre de recharge de la nappe profonde (RCHRG_DP) qui reflète une bonne alimentation des aquifères à partir des couches superficielles. En outre, le paramètre ALPHA_BF montre que l'eau qui rejoint la nappe profonde en ressort. La sensibilité de ces deux paramètres montre l'existence des échanges nappes-rivières sur le BVHBKB. La capacité de rétention d'eau des sols (SOL_AWC) est l'un des paramètres fréquemment modifiés, comme indiqué dans les études d'Arnold *et al.* (2012). En effet, si une partie de la pluie tombée peut être stockée dans le sol et que celle-ci est transférée lentement vers les autres horizons et les cours d'eau, les plantes de canne à sucre peuvent capter plus d'eau. L'encombrement végétatif et la ramification du réseau hydrographique (indiqué par les paramètres de rugosité de Manning : CH_N pour le cours d'eau principal et CH_W2 pour les affluents) affectent le temps de concentration et donc la dynamique des crues. C'est pourquoi, en période sèche (1981-1986) la valeur du PBIAS au calage (PBIAS < 0) indique que le modèle surestime les débits tandis qu'en période humide, à la validation (PBIAS > 0), le modèle sous-estime les débits (Moriassi *et al.*, 2007). Cela est une des insuffisances du modèle hydrologique SWAT à ne pas reproduire correctement les pics de crue.

La calibration et la validation du modèle ont été effectuées respectivement sur les périodes 1981-1985 et 1986-1990. A la calibration, les valeurs des critères d'évaluation que sont : le Nash (NSE = 0,69), le coefficient de détermination $R^2 = 70 \%$ et le pourcentage d'erreur PBIAS = -5,7 % obtenues indiquent une bonne performance du modèle. Également, à la validation, le NSE = 77 %, le $R^2 = 77 \%$ et le PBIAS = 6,6 % obtenues indiquent une bonne performance du modèle. Cette performance est traduite par une bonne corrélation entre les débits observés et simulés. Il faut également indiquer que le débit de base simulé est correct et quasi similaire au débit de base mesuré. Le débit de base étant le débit du cours d'eau en l'absence de précipitations, est causé principalement par la nappe d'accompagnement. Ce débit de base se visualise sur le graphique comme étant la ligne de base de tous les pics.

Le modèle SWAT ainsi calé et validé a permis la reconstitution des débits sur la période 1986-2016 à l'exutoire du bassin versant et à l'entrée des retenues de Morrison et Lokpoho au niveau des complexes sucriers de Ferkessédougou. Également, la simulation a permis de voir

l'évolution des débits journaliers, des débits décennaux et d'apprécier la répartition spatiale des paramètres du bilan hydrologique sur les périodes 1986-2016 et 2021-2050.

La simulation des débits montre qu'à l'exutoire du bassin versant et à l'entrée du réservoir de Morriçon, il y a une baisse des débits de $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$ par an, soit $6,79 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1986-2016. Les débits à l'entrée de la retenue de Lokpoho sont quasi stationnaires.

A l'horizon 2050, l'ensemble des modèles étudiés prévoit une baisse des débits de 11,27 % et de 16,75 % en moyenne à l'exutoire du bassin versant selon le scénario RCP4.5 et RCP8.5 respectivement.

La baisse des débits selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 est l'amplification des baisses de débit observé sur la période 1986-2016. Cela pourrait être le résultat de la multiplication des petits barrages à usage agricole dans le Haut Bandama (plus de 100 barrages hydro-agricoles). En effet, en retenant l'eau, les barrages augmentent la surface d'évaporation de l'eau. Ces ouvrages et aménagements agricoles réduisent les débits et perturbent le cycle hydrologique en atténuant les pics de crues (Konan, 2002 ; Kingumbi, 2006 ; Payan 2007 ; Kouadio 2011 et Kouassi *et al.*, 2019).

En ce qui concerne l'évapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR), de façon générale sur le bassin versant du Haut Bandama, le modèle SWAT montre une augmentation de l'ETP et une baisse de l'ETR. Effectivement, des changements dans la couverture végétale tels que la déforestation ou la conversion de terres en zones urbaines observés par Ouedé *et al.* (2023), peuvent entraîner une augmentation de l'ETP. Les surfaces urbaines, par exemple, ont souvent des températures plus élevées et moins de végétation, ce qui favorise une évaporation accrue. En même temps, la diminution de la végétation peut entraîner une diminution de l'ETR car il y a moins de plantes pour transpirer. Selon Kouadio (2011), les simulations des cas réels et prévisionnels d'occupation des terres permettent aussi de mettre en évidence la diminution des lames d'eau infiltrées à la suite de la dégradation de la surface des bassins.

Le bilan hydrologique simulé sur l'ensemble du bassin versant par le modèle SWAT sur les périodes 1986-2016 et 2021-2050 permet d'apprécier l'évolution de ces paramètres selon deux scénarios (RCP4.5 et 8.5) issus de trois modèles climatiques régionaux (CanESM2, CCLM4 et RCA4) sur la période 2021-2050.

En premier lieu, le modèle RCA4 affiche une hausse des paramètres que sont : la pluie (de 1 et 8 % respectivement selon les scénarios RCP4.5 et 8.5) et le ruissellement (de 76 et 112 % respectivement selon les scénarios RCP4.5 et 8.5). L'ETR et l'infiltration simulées par ce modèle affichent des valeurs à la baisse de 3 et 1 % respectivement selon les scénarios RCP4.5

et RCP8.5 pour l'ETR et de 24 et 16 % respectivement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour l'infiltration.

Ensuite, le modèle CanESM2 montre une baisse de la pluviométrie moyenne annuelle de 26 et 31 % respectivement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Au niveau de l'ETR, on a une réduction de 31 et 32 % respectivement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Quant aux lames d'eau ruisselée et infiltrée, l'évolution est en sens inverse. La lame d'eau ruisselée augmente de 74 % tandis que celle infiltrée diminue de 59 % selon le scénario RCP4.5. Le scénario RCP8.5 quant à lui, affiche une hausse de 45 % du ruissellement et une baisse de 67 % de l'infiltration. Pour couronner, le modèle CCLM4 affiche une régression de la pluviométrie, de l'ETR et de l'infiltration respectivement de 24, 26 et 48 % selon le scénario RCP4.5. Par contre, pour ces mêmes paramètres, le scénario RCP8.5 affiche 23, 26 et 51 % respectivement. Le ruissellement, augmente de 35 et 43 % respectivement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

D'après Bigot *et al.* (2005), la réduction ou l'augmentation des paramètres du bilan hydrologique sur un bassin versant est dans un premier temps, le résultat des changements thermiques de l'océan Atlantique équatorial. Cependant, les interactions à l'échelle relativement globale et les processus d'échange océan-atmosphère plus régional dans la variabilité des précipitations en Côte d'Ivoire ne sont pas encore bien raffinés quantitativement (Kouakou, 2011).

La spatialisation des paramètres climatiques simulés montre que le ruissellement et l'ETP sont majoritairement élevés au Sud tandis que les infiltrations sont beaucoup plus élevées à l'Ouest et légèrement au Centre du bassin versant. Cela est dû à la présence à l'Ouest du bassin versant de métasédiments métavolcaniques (sable fin) (Ouédraogo, 2016) qui sont des formations favorisant les infiltrations et limitant le ruissellement. Ces formations favorisent également la recharge des nappes souterraines dans les zones où elles se trouvent en raison de leur caractère poreux. C'est pourquoi, Ouédraogo (2016) a trouvé dans ces zones des débits de forage variant de 5 à 18 m³/h. Au Sud du bassin versant, la dégradation du couvert végétal due à l'extension des villes et des cultures, favorise l'augmentation des lames d'eau ruisselées.

La modélisation 5 et 10 jours consécutives de pluie et de la propagation des crues à différentes périodes de retour dans les périmètres des complexes sucriers de Ferkessedougou à l'aide du modèle HEC-RAS a permis de connaître les hauteurs d'eau et les surfaces inondées. Les résultats de calibration et de validation obtenus montrent d'une manière générale que le modèle reproduit bien les conditions d'écoulement du milieu, avec des critères de Nash qui sont de 68 % au calage et 63 % à la validation. Selon Hostache (2006) ainsi que Koffi *et al.* (2007), lorsque

les valeurs de Nash sont comprises entre 60 % et 80 %, l'application du modèle est dite satisfaisante.

Le coefficient de Manning utilisé pour le calage du modèle est de $0,06 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette valeur est certes élevée, mais acceptable, en raison de la sinuosité du cours d'eau et de la rugosité du lit. Ces résultats sont conformes aux travaux de Chow (1959) et Kouassi *et al.* (2019), qui indiquent que le coefficient de Manning-Strickler est généralement élevé pour les cours d'eau ayant plusieurs méandres et une végétation sur les berges.

La simulation de 5 et 10 jours consécutives de pluies montre que lors de ces évènements les terrains aux altitudes en dessous de 381 et 382 m respectivement dans les complexes sucriers de Ferkessédougou seront inondés. Les superficies totales des parcelles susceptibles d'être inondées par 5 et 10 jours consécutives de pluies sont respectivement de 528 et 1 759 ha.

A la lumière des résultats de simulation de la propagation des crues du fleuve Bandama à différentes périodes de retour, on peut dire que les usines de production de sucre de la SUCAF-CI (Ferké 1 et Ferké 2) ne sont pas dans la zone à risque d'inondation. Cependant, les parcelles de canne ont été touchées par la propagation des crues. Les cotes maximales atteintes par les crues de périodes de retour 2, 10, 50 et 100 ans sont respectivement de 299,03 m, 299,54 m, 300,04 et 300,07 m et les parcelles inondées concernent celles situées le long du fleuve et proches des affluents. Les proportions de champs inondés selon les périodes de retour sont de 546,8 ha, 708 ha, 729 ha et 757,2 ha respectivement pour les périodes de retour de 2 ans, 10 ans, 50 ans et 100 ans.

Les cotes de l'eau lors de la propagation des crues à différentes périodes de retour varient certes peu d'une période à l'autre. Cependant, les superficies inondées par les crues d'une période à l'autre sont considérables. En effet, les inondations provoquées par des crues sont l'effet de la dégradation des berges par la pratique des activités anthropiques (cultures maraîchères, dragage du lit et des berges etc.) à proximité des cours d'eau. Ces pratiques réduisent la pente des berges et favorisent l'extension des crues. Cela corrobore les études de Kouassi *et al.* (2021) à l'embouchure du fleuve Comoé où les cotes de l'eau lors des crues de périodes de retour 2, 10, 50 et 100 ans respectivement de 21,3 ; 21,4 ; 21,8 et 22,3 m et inondent respectivement 8 563 ha, 8 942 ha, 10 167 ha et 10 710 ha de terres environnantes.

Conclusion partielle

La modélisation du bassin versant du Haut Bandama par le modèle SWAT après une analyse de sensibilité a montré une sensibilité de plusieurs paramètres aux écoulements. Les paramètres tels que RCHRG_DP et ALPHA_BF montrent l'existence des échanges nappes-rivières sur le

bassin versant du Haut Bandama. Les paramètres influençant l'évapotranspiration affectent également la quantité d'eau annuelle mais permettent d'ajuster les débits au niveau saisonnier. La réserve utile des sols (SOL_AWC) fait partie des paramètres régulièrement ajustés. L'encombrement végétatif (rugosité de Manning : CH_N) affecte le temps de concentration et donc la dynamique des crues. Les paramètres ainsi déterminés, leur ajustement a permis de calibrer et valider le modèle SWAT sur le BVHBKB. La simulation des paramètres hydroclimatiques du bassin versant a permis d'observer que les débits à son exutoire et à l'entrée de la retenue de Morrison sont en baisse tandis que les débits à l'entrée de la retenue de Lokpoho sont quasi stationnaires sur la période 1986-2016.

Les projections sur la période 2021-2050 des ressources en eau disponible (pluie, débit) à travers les modèles RCA4, CanESM2 et CCLM4 montre une possibilité d'extension des parcelles avec le scénario RCP4.5 qui montre une augmentation des écoulements avec la moyenne des modèles.

Cependant, le scénario RCP8.5 réduit cette possibilité d'extension des parcelles de canne à sucre en indiquant sur la période 2021-2050, une continuité de la baisse des écoulements observé sur la période 1986-2016 par la plupart des scénarios climatiques. A cela s'ajoute les inondations causées par les extrêmes pluviométriques et hydrologiques dans les complexes sucriers de Ferkessédougou. En effet, la simulation des extrêmes hydrologiques et/ou pluviométriques avec le modèle HEC RAS a permis d'observer les parcelles inondées dans les périmètres sucriers de la SUCAF-CI après le passage d'une crue et/ou d'une pluie extrême permettant ainsi de cibler les zones d'implantation des réseaux de drainage. Tout de même, en raison des baisses des précipitations et des débits annoncés, pour une bonne planification des activités d'extension des parcelles de canne à sucre, une analyse de l'adéquation disponibilité-besoin en eau s'impose.

CHAPITRE 8 : ADEQUATION DISPONIBILITE-BESOIN EN EAU DANS LES COMPLEXES SUCRIERS DE FERKESSEDOUGOU

8.1. Analyse de la disponibilité en eau des retenues de Morrison et Lokpo

8.1.1. Analyse de la morphologie de la retenue d'eau de Morrison

La figure 119A et la figure 119B présentent respectivement la carte de la bathymétrie et la carte des pentes de la retenue d'eau de Morrison. La cote 292,2 m du plan d'eau à la date du 20 Février 2020 (date des levés bathymétriques) a été retenue comme cote de référence. La profondeur maximale sondée est de 13,33 m. La topographie du fond de la retenue d'eau est caractérisée par une morphologie perturbée par des variations brusques de pentes. Ces pentes atteignent 27° par endroits surtout le long du cours d'eau.

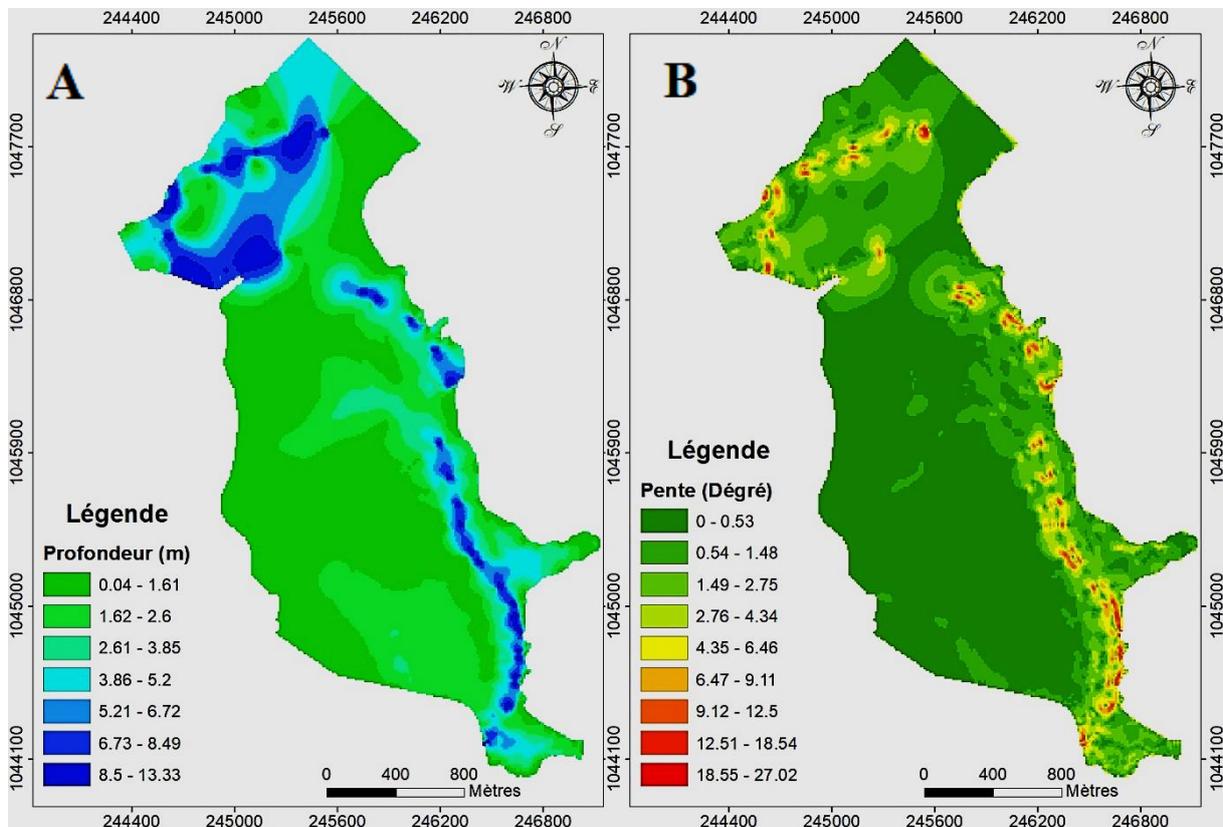


Figure 119 : Morphologies des fonds du barrage de Morrison : carte bathymétrique (A) et carte des pentes (B)

8.1.2. Analyse des courbes hauteur-surface et hauteur-volume du barrage Morrison

La figure 120 et la figure 121 montrent respectivement l'évolution de la surface et du volume d'eau moyenne de la retenue en fonction des cotes d'eau. Ces courbes présentent une allure logarithmique avec une cote d'eau de 292,2 m à la date du 20 Février 2020 (date des levés

bathymétriques). Cette cote d'eau correspond à une surface de 67 716 m² et un volume de 11 656 735 m³.

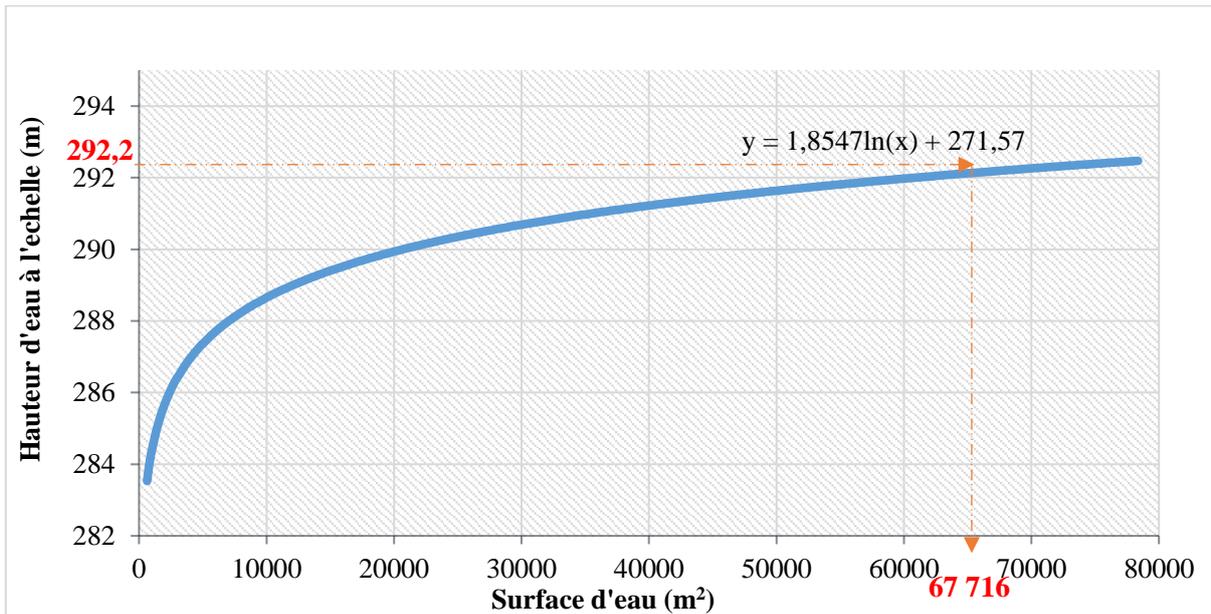


Figure 120 : Courbe hauteur-surface de la retenue de Morrisson

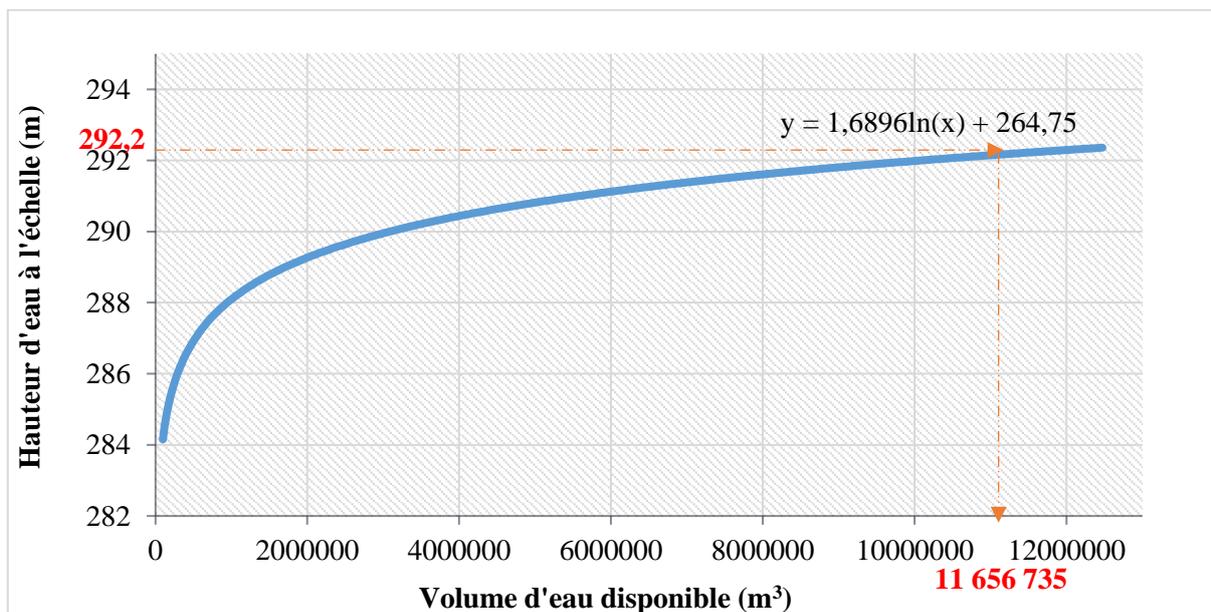


Figure 121 : Courbe hauteur-volume de la retenue de Morrisson

8.1.3. Analyse de la morphologie de la retenue d'eau de Lopkoho

La figure 122A et la figure 122B présente respectivement la carte de la bathymétrie et la carte des pentes de la retenue Lopkoho. Les profondeurs sont moins importantes et atteignent 8,86 m. La cote 296 m du plan d'eau a été retenue comme cote de référence et la superficie de la zone du levé bathymétrique est de 18 639 m² pour la date du 21 Février 2020 (date des levés

bathymétriques). Le fond de la retenue d'eau est caractérisé par une morphologie perturbée par des variations brusques de pente dans la zone du projet. Ces pentes atteignent 14° par endroits surtout en approche de la digue.

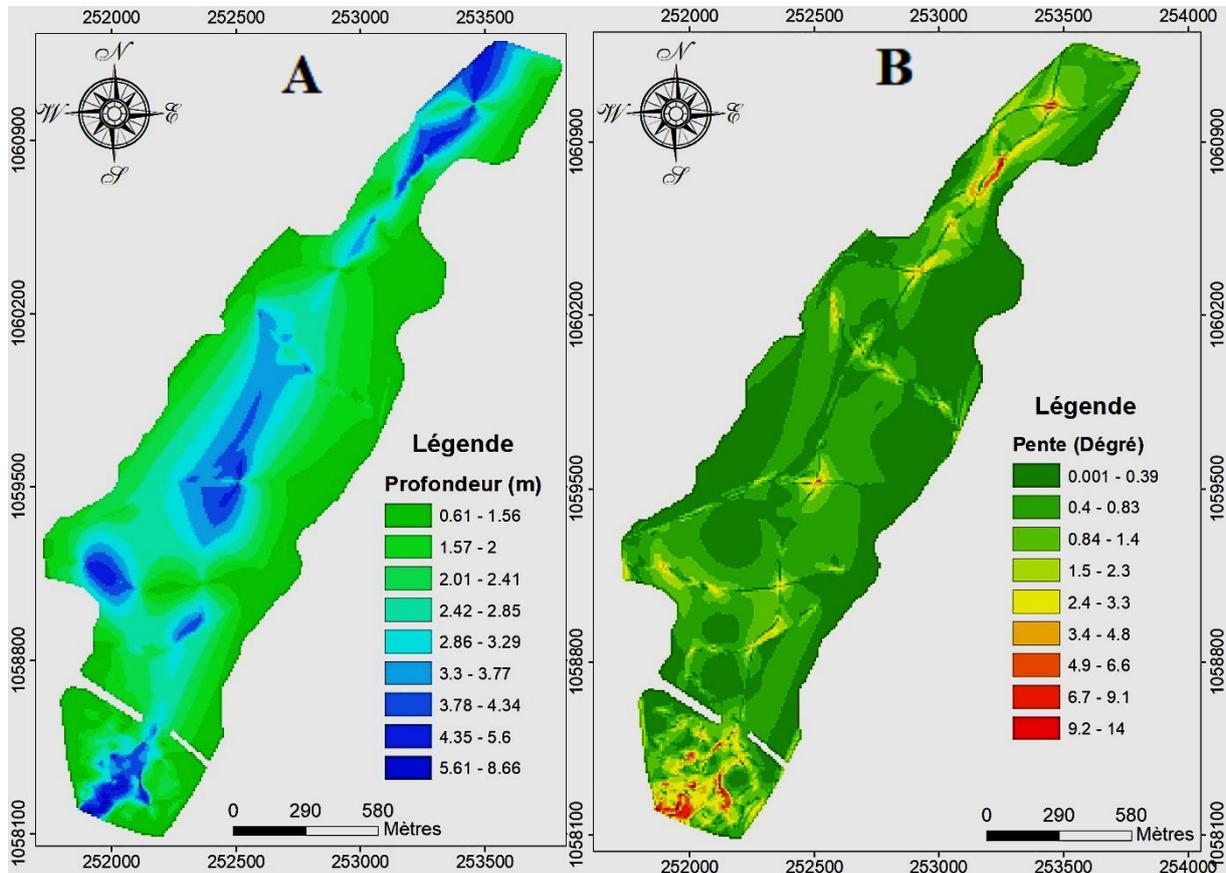


Figure 122 : Cartes morphologiques du barrage de Lopkoho : carte bathymétrique (A) et carte des pentes (B)

8.1.4. Analyse des courbes hauteur-volume et hauteur-surface du barrage Lokpoho

La figure 123 et la figure 124 présentent l'évolution de la surface et du volume moyen d'eau de la retenue en fonction des différentes profondeurs d'eau. La forme de la courbe semble suivre une tendance logarithmique, avec une cote d'eau de 296 m enregistrée lors des levés bathymétriques effectués le 21 février 2020. À cette cote d'eau, la surface de la retenue était de $18\,639\text{ m}^2$, tandis que le volume d'eau contenu s'élevait à $3\,157\,235\text{ m}^3$.

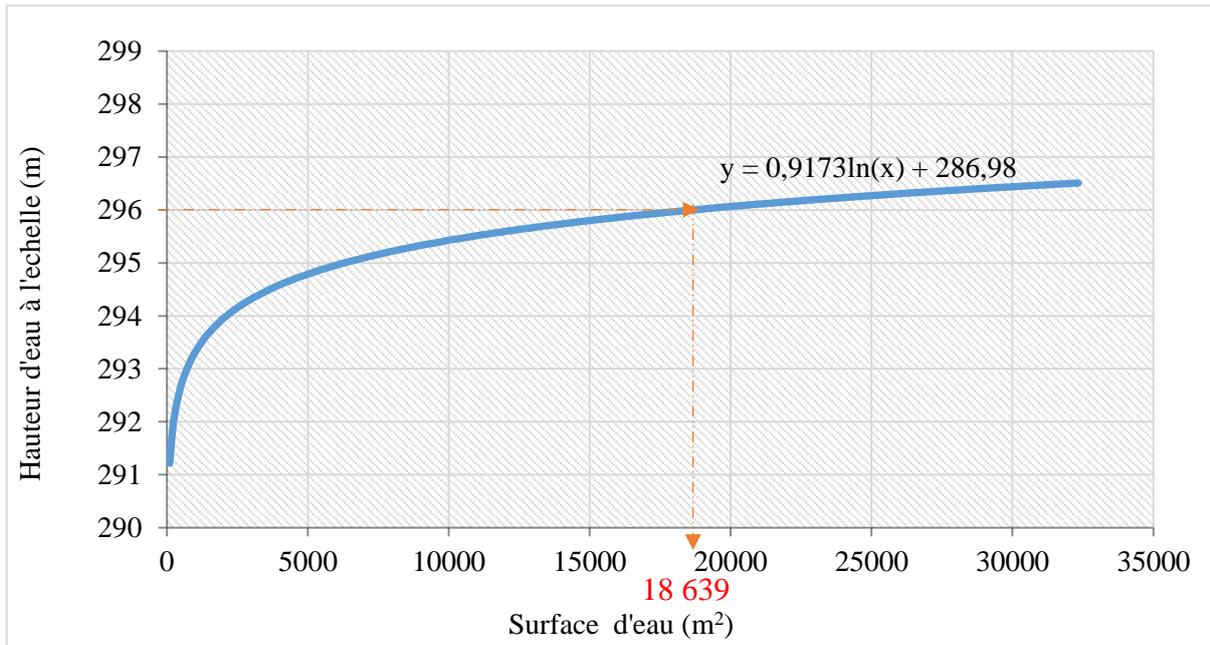


Figure 123 : Courbe hauteur-surface de la retenue de Lopkoho

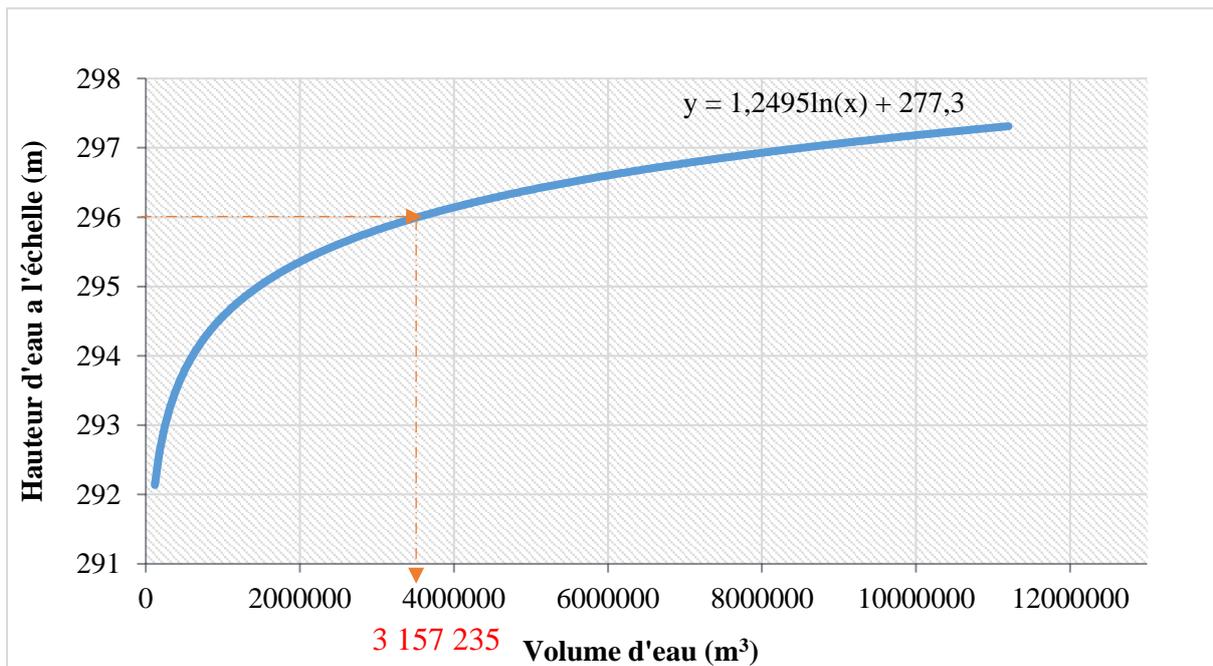


Figure 124 : Courbe hauteur-volume de la retenue de Lopkoho

8.1.5. Synthèse des caractéristiques des retenues

La bathymétrie des retenues de Lokpoho et Morrison a permis de décrire leur morphologie et de déterminer la disponibilité de la ressource en eau de ces différents réservoirs comme l'indique le tableau XLV. Ce tableau indique que la cote 297,5 m et 293,3 correspondent à la cote de retenue normale respective de Lokpoho et Morrison. À ces cotes la surface du plan

d'eau est de 95 653 m² et 122 508 m² avec un volume d'eau de 10 496 155 m³ et 21 802 488 m³ respectivement pour les retenues de Lokpoho et Morrison. C'est ce volume issu de la cote de retenues normale qui a été utilisé pour l'analyse du rapport disponibilité-besoin de la ressource en eau des réservoirs.

Tableau XLV : Synthèse des cotes de références, surfaces et volumes d'eau stockée

Barrage	Références	Cote (m)	Surface (m ²)	Volume (m ³)
Lokpoho	Cote des plus hautes eaux	297,8	132 514	13 352 961
	Cote minimale exploitable	291,5	138	86 208
	Cote retenue normale	297,5	95 653	10 496 155
	Cote de référence bathymétrique	296,0	18 639	3 157 235
Morrison	Cote des plus hautes eaux	293,8	160 452	29 323 630
	Cote minimale exploitable	285,0	1 396	160 344
	Cote retenue normale	293,3	122 508	21 802 488
	Cote de référence bathymétrique	292,2	67 716	11 656 735

8.2. Analyse des besoins en eau dans les complexes sucriers de Ferkessédougou

La demande en eau pour chaque retenue du complexe sucrier de Ferkessédougou est résumée dans le tableau XLVI et le tableau XLVII respectivement pour les retenues Lokpoho et Morrison. Ces tableaux montrent que les besoins en eau sont plus élevés en période sèche qu'en période humide avec pour maximum 3 256 969 m³ dans le mois de Novembre pour la retenue de Lokpoho (Tableau XLVI) et de 18 110 996 m³ dans le mois de Mars pour la retenue de Morrison (Tableau XLVII).

Tableau XLVI : Demande en eau sur la retenue de Lopkoho

Besoin en eau Lokpoho (m ³ /mois)			
Mois	Besoin irrigation	AEP ou zone vie	Total besoin
Janv.	1 442 843	694 096	2 136 939
Févr.	1 086 901	612 770	1 699 671
Mars	1 619 782	694 909	2 314 691
Avril	1 533 986	497 538	2 031 524
Mai	1 013 088	455 937	1 469 025
Juin	693 647	46 205	739 852
Juil.	1 708 130	261 163	1 969 292
Août	1 617 610	348 755	1 966 365
Sept.	1 333 994	318 857	1 652 851
Oct.	1 416 037	243 253	1 659 290
Nov.	2 553 289	703 680	3 256 969
Déc.	1 768 891	253 017	2 021 908

Tableau XLVII : Demande en eau sur la retenue de Morrisson

Besoin en eau Morrisson (m³/mois)			
Mois	Besoin irrigation	AEP ou zone vie	Total besoin
Janv.	17 348 824	528 912	17 877 736
Févr.	16 123 629	498 996	16 622 625
Mars	17 673 296	437 700	18 110 996
Avril	13 489 509	355 284	13 844 793
Mai	11 044 652	434 136	11 478 788
Juin	7 235 682	149 100	7 384 782
Juil.	9 984 261	125 952	10 110 213
Août	3 232 840	113 880	3 346 720
Sept.	2 958 845	90 972	3 049 817
Oct.	8 143 960	197 323	8 341 283
Nov.	15 277 199	506 460	15 783 659
Déc.	17 545 702	522 960	18 068 662

8.3. Analyse de l'adéquation disponibilité-besoins en eau sur la période 1986-2016 dans le complexe sucrier de Ferkessédougou

Le tableau XLVIII et le tableau XLIX montrent le rapport de la disponibilité-besoin en eau du complexe sucrier de Ferkessédougou tenant compte des débits moyens mensuel des années hydrologiques sèches sur la période 1986-2016. L'analyse est effectuée avec un plan d'eau normal à la cote de 297,5 m (pour un volume d'eau de 10 496 155 m³) et un seuil minimal exploitable à la cote de 291,5 m (correspondant 86 208 m³) sur la retenue de Lokpoho. Elle est effectuée sur la retenue Morrisson avec un plan d'eau normal à la cote de 293,3 m (pour un volume de 21 802 488 m³) et un seuil minimal exploitable fixé à la cote de 285 m qui maintient un volume d'eau de 160 344 m³. Ainsi, cette analyse montre que la retenue de Lokpoho n'arrive pas à satisfaire la demande en eau qui lui est attribuée sur trois mois. Les mois non satisfaits sont les mois de Janvier, Février et Mars qui font partir de la période sèche avec un pic du déficit hydrique de 1 906 597 m³ dans le mois de Février suivit de 1 555 469 et 114 170 m³ respectivement dans les mois de Janvier et Mars.

La retenue de Morrisson également ne parvient pas à satisfaire les besoins en eau sur 3 mois (Février, Mars et Avril). Le déficit hydrique atteint un pic de 18 659 108 m³ dans le mois de Mars suivit de 12 857 433 m³ en Avril et 8 145 115 m³ en Mars.

Tableau XLVIII : Rapport disponibilité-besoins en eau de la retenue de Lokpoho (1986-2016)

Seuil minimal exploitable 86 208 m³	Apport en eau	Débit prélevable	Volume d'eau dans la cuvette	Volume d'eau évaporé	Besoin en eau	Rapport disponibilité-besoins en eau	Niveau de satisfaction
Mois	m³/s	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	
Janv.	0,10	237 358	237 358	430 559	2 136 939	-1 555 469	Non satisfait
Févr.	0,10	222 213	222 213	429 139	1 699 671	-1 906 597	Non satisfait
Mars	1,15	2 682 720	2 682 720	482 199	2 314 691	-114 170	Non satisfait
Avril	3,63	8 459 122	8 459 122	449 594	2 031 524	5 978 004	Satisfait
Mai	11,36	26 499 028	10 496 155	431 453	1 469 025	8 595 677	Satisfait
Juin	15,72	36 680 947	10 496 155	389 446	739 852	9 366 857	Satisfait
Juil.	12,09	28 208 820	10 496 155	376 536	1 969 292	8 150 327	Satisfait
Août	8,78	20 480 479	10 496 155	370 852	1 966 365	8 158 939	Satisfait
Sept.	5,35	12 489 267	10 496 155	374 438	1 652 851	8 468 867	Satisfait
Oct.	2,79	6 507 759	6 507 759	404 114	1 659 290	4 444 356	Satisfait
Nov.	0,91	2 132 318	2 132 318	403 544	3 256 969	2 916 161	Satisfait
Déc.	0,13	306 279	306 279	425 861	2 021 908	774 671	Satisfait

Tableau XLIX : Rapport disponibilité-besoins en eau de la retenue de Morrison (1986-2016)

Seuil minimal exploitable 160 344 m³	Apport en eau	Débit prélevable	Volume d'eau dans la cuvette	Volume d'eau évaporé	Besoin en eau	Rapport disponibilité-besoins en eau	Niveau de satisfaction
Mois	m³/s	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	
Janv.	2,74	6 399 887	6 399 887	17 877 736	952 265	8 125 444	Satisfait
Févr.	0,56	1 311 278	1 311 278	16 622 625	959 213	-8 145 115	Non satisfait
Mars	0,23	541 694	541 694	18 110 996	1 089 806	-18 659 108	Non satisfait
Avril	0,86	2 003 736	2 003 736	13 844 793	1 016 376	-12 857 433	Non satisfait
Mai	5,45	12 706 369	12 706 369	11 478 788	952 222	275 360	Satisfait
Juin	13,71	31 976 267	21 802 488	7 384 782	842 019	13 575 687	Satisfait
Juil.	48,83	113 921 152	21 802 488	10 110 213	808 047	10 884 228	Satisfait
Août	116,50	271 772 142	21 802 488	3 346 720	793 749	17 662 019	Satisfait
Sept.	134,18	313 004 920	21 802 488	3 049 817	802 972	17 949 698	Satisfait
Oct.	84,76	197 734 561	21 802 488	8 341 283	868 511	12 592 694	Satisfait
Nov.	33,03	77 056 421	21 802 488	15 783 659	869 466	17 742 057	Satisfait
Déc.	10,83	25 271 156	21 802 488	18 068 662	920 325	20 555 558	Satisfait

8.4. Analyse de l'adéquation disponibilité-besoins en eau sur la période 2021-2050 dans le complexe sucrier de Ferkessédougou

8.4.1. Détermination des besoins en eau sur la période 2021-2050

Les besoins en eau sur la période 2021-2050 concernent les besoins en Alimentation en Eau Potable (AEP) de la zone vie et des deux complexes Ferké 1 et Ferké 2 (Tableau L et Tableau LI). Les besoins totaux mensuels en eau de la SUCAF-CI alloués à la retenue d'eau de Lokpoho sur la période 2021-2050 pour le scénario RCP4.5 s'élèvent à 3 329 734 m³ pour le mois de Novembre représentant la valeur maximale suivie de ceux des mois de Mars et Janvier

respectivement de 2 360 400 m³ et 2 177 519 m³. Cependant, le scénario RCP8.5 montre des besoins légèrement élevés à ceux du RCP4.5 avec 3 334 426 m³ pour le mois de Novembre comme la valeur maximale suivie de ceux des mois de Mars et Janvier respectivement de 2 363 348 m³ et 2 180 135 m³ (Tableau L).

Tableau L : Besoins en eau sur la période 2021-2050 de la retenue d'eau de Lokpoho

Mois	Besoin en eau RCP4.5		Besoin en eau RCP8.5		
	AEP ou zone vie	RCP4.5 Irrigation	Total besoin RCP4.5	RCP8.5 Irrigation	Total besoin RCP8.5
Janv.	737 643	1 439 876	2 177 519	1 442 492	2 180 135
Févr.	651 126	1 078 953	1 730 079	1 080 914	17 32 040
Mars	738 507	1 621 893	2 360 400	1 624 841	2 363 348
Avril	528 538	1 546 573	2 075 111	1 549 383	2 077 921
Mai	484 282	1 013 301	1 497 583	1 015 142	1 499 424
Juin	48 397	711 507	759 904	712 800	761 197
Juil.	277 075	1 741 291	2 018 366	1 744 456	2 021 531
Août	370 258	1 642 394	2 012 652	1 645 379	2 015 637
Sept.	338 452	1 352 517	1 690 969	1 354 974	1 693 426
Oct.	258 022	1 441 905	1 699 927	1 444 525	1 702 547
Nov.	747 838	2 581 896	3 329 734	2 586 588	3 334 426
Déc.	268 410	1 804 349	2 072 759	1 807 628	2 076 038

Sur la période 2021-2050, selon le scénario RCP4.5, les besoins mensuels en eau de la SUCAF-CI attribuer à la retenue d'eau de Morrison atteindront un maximum de 22 407 696 m³ en Mars comme valeur maximale, suivi de 21 520 489 m³ en Janvier et de 21 137 210 m³ en Décembre. En revanche, le scénario RCP8.5 prévoit des besoins légèrement supérieurs, avec un maximum de 22 436 396 m³ en Mars, suivi de 21 993 377 m³ en Décembre et de 21 749 934 m³ en janvier (Tableau LI).

Tableau LI : Besoins en eau sur la période 2021-2050 de la retenue d'eau de Morrison

Mois	Besoin FERKE 2 RCP4.5		Besoin FERKE 2 RCP8.5		
	AEP ou zone vie	Irrigation RCP4.5	Total besoin RCP4.5	Irrigation RCP8.5	Total besoin RCP8.5
Janv.	544 250	20 976 238	21 520 489	21 205 683	21 749 934
Févr.	513 467	18 992 022	19 505 488	2 009 1415	20 604 881
Mars	450 393	21 957 302	22 407 696	21 986 002	22 436 396
Avril	365 587	16 755 740	17 121 327	17 464 940	17 830 527
Mai	446 726	12 432 851	12 879 577	14 969 012	15 415 738
Juin	153 424	9 714 169	9 867 593	10 373 000	10 526 424
Juil.	129 605	11 675 190	11 804 794	13 015 196	13 144 801
Août	117 183	4 140 469	4 257 652	4 083 399	4 200 582
Sept.	93 610	3 852 790	3 946 400	3 900 019	3 993 629
Oct.	203 045	9 209 794	9 412 839	9 190 000	9 403 045
Nov.	521 147	16 996 292	17 517 439	19 505 491	20 026 638
Déc.	538 126	20 599 084	21 137 210	21 455 251	21 993 377

8.4.2. Rapport disponibilité-besoins en eau sur la période 2021-2050 sur la retenue d'eau de Lokpoho

Le tableau LII et le tableau LIII montrent le niveau de satisfaction des besoins en eau sur la retenue Lokpoho selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Le scénario RCP4.5 annonce un déficit hydrique au niveau des mois de Mars, Avril, Mai et Juillet avec un pic du déficit de 2 293 765 m³ dans le mois d'Avril (Tableau LII). Cependant, le scénario RCP8.5 indique un déficit plus prononcé que le scénario RCP4.5 qui s'étend sur 6 mois non satisfaits avec un pic du déficit hydrique de 6 640 708 m³ dans le mois d'Avril (Tableau LIII).

Tableau LII : Disponibilité-besoins en eau sur la retenue Lokpoho (période 2021-2050, RCP 4.5)

Seuil minimal exploitable m³	Apport en eau	Débit prélevable	Volume d'eau dans la cuvette	Besoin en eau	Volume d'eau évaporé	Rapport disponibilité-besoin en eau	Niveau de satisfaction
86 208	m³/s	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	
Janv.	1,38	3 219 789	3 219 789	2 177 519	434 003	2 456 467	Satisfait
Févr.	0,71	1 658 788	1 658 788	1 730 079	432 572	1 952 605	Satisfait
Mars	0,33	774 655	774 655	2 360 400	486 056	-119 196	Non satisfait
Avril	0,15	353 543	353 543	2 075 111	453 001	-2 293 765	Non satisfait
Mai	0,05	114 922	114 922	1 497 583	434 905	-1 817 566	Non satisfait
Juin	1,00	2 342 875	2 342 875	759 904	392 562	1 190 409	Satisfait
Juil.	0,96	2 241 200	2 241 200	2 018 366	379 548	-156 714	Non satisfait
Août	2,22	5 181 701	5 181 701	2 012 652	373 819	2 795 230	Satisfait
Sept.	3,77	8 802 021	8 802 021	1 690 969	377 433	6 733 618	Satisfait
Oct.	2,38	5 556 436	5 556 436	1 699 927	407 347	3 449 162	Satisfait
Nov.	1,30	3 023 323	3 023 323	3 329 734	406 773	2 735 978	Satisfait
Déc.	0,69	1 614 249	1 614 249	2 072 759	429 268	1 848 200	Satisfait

Tableau LIII : Disponibilité-besoins en eau sur la retenue Lokpoho (période 2021-2050, RCP 8.5)

Seuil minimal exploitable m³	Apport en eau	Débit prélevable	Volume d'eau dans la cuvette	Besoin en eau	Volume d'eau évaporé	Rapport disponibilité-besoin en eau	Niveau de satisfaction
86208	m³/s	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	
Janv.	0,37	855 768	855 768	2 180 135	435 741	900 846	Satisfait
Févr.	0,002	4 401	4 401	1 732 040	434 304	-1 261 097	Non satisfait
Mars	0,001	2 333	2 333	2 363 348	488 002	-4 110 114	Non satisfait
Avril	0,001	2 333	2 333	2 077 921	455 005	-6 640 708	Non satisfait
Mai	0,001	2 333	2 333	1 499 424	436 646	-1 933 737	Non satisfait
Juin	0,17	388 415	388 415	761 197	394 134	-766 916	Non satisfait
Juil.	0,99	2 303 722	2 303 722	2 021 531	381 068	-98 877	Non satisfait
Août	2,73	6 379 753	6 379 753	2 015 637	375 315	3 988 800	Satisfait
Sept.	4,57	10 658 524	10 496 155	1 693 426	378 945	8 423 784	Satisfait
Oct.	2,84	6 619 869	6 619 869	1 702 547	408 978	4 508 344	Satisfait
Nov.	1,53	3 560 536	3 560 536	3 334 426	408 401	4 326 052	Satisfait
Déc.	0,36	841 926	841 926	2 076 038	430 986	2 660 953	Satisfait

8.4.3. Rapport disponibilité-besoins en eau sur la période 2021-2050 sur la retenue d'eau de Morrisson

Le tableau LIV et le tableau LV montrent le rapport disponibilité-besoin en eau au niveau de la retenue Morrisson respectivement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Ces deux scénarios montrent qu' sur la période 2021-2050, la retenue Morrisson ne pourra pas satisfaire les besoins en eau qui lui sont attribués de Janvier à Avril, soient 4 mois d'insatisfaction. Les pics de déficit hydrique atteignent 21 919 656 et 20 263 442 m³ respectivement pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 en Mars (Tableau LIV et Tableau LV).

Tableau LIV : Disponibilité-besoins en eau sur la retenue de Morrisson (période 2021-2050, RCP4.5)

Seuil minimal exploitable m³	Apport en eau	Débit prélevable	Volume d'eau dans la cuvette	Besoin en eau	Volume d'eau évaporé	Rapport disponibilité-besoin en eau	Niveau de satisfaction
160 344	m³/s	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	
Janv.	2,76	6 450 032	6 450 032	21 520 489	952 837	-1 343 214	Non satisfait
Févr.	0,60	1 389 226	1 389 226	19 505 488	959 788	-19 076 051	Non satisfait
Mars	0,68	1 578 500	1 578 500	22 407 696	1 090 460	-21 919 656	Non satisfait
Avril	1,17	2 739 555	2 739 555	17 121 327	1 016 986	-15 398 758	Non satisfait
Mai	6,68	15 585 613	15 585 613	12 879 577	952 793	1 753 243	Satisfait
Juin	17,38	40 534 837	21 802 488	9 867 593	842 524	11 092 370	Satisfait
Juil.	41,95	97 864 953	21 802 488	11 804 794	808 532	9 189 162	Satisfait
Août	96,40	224 892 701	21 802 488	4 257 652	794 225	16 750 612	Satisfait
Sept.	111,96	261 177 583	21 802 488	3 946 400	803 454	17 052 634	Satisfait
Oct.	78,52	183 173 645	21 802 488	9 412 839	869 032	11 520 617	Satisfait
Nov.	35,10	81 878 368	21 802 488	17 517 439	869 987	14 935 678	Satisfait
Déc.	11,84	27 612 399	21 802 488	21 137 210	920 877	14 680 079	Satisfait

Tableau LV : Disponibilité-besoins en eau sur la retenue de Morrisson (période 2021-205, RCP8.5)

Seuil minimal exploitable m³	Apport en eau	Débit prélevable	Volume d'eau dans la cuvette	Besoin en eau	Volume d'eau évaporé	Rapport disponibilité-besoin en eau	Niveau de satisfaction
160 344	m³/s	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	
Janv.	1,78	4 160 615	4 160 615	21 749 934	953 599	-8 479 918	Non satisfait
Févr.	0,65	1 517 088	1 517 088	20 604 881	960 556	-20 048 349	Non satisfait
Mars	1,40	3 264 286	3 264 286	22 436 396	1 091 332	-20 263 442	Non satisfait
Avril	3,59	8 372 925	8 372 925	17 830 527	1 017 800	-10 475 402	Non satisfait
Mai	10,50	24 495 364	21 802 488	15 415 738	953 555	5 433 194	Satisfait
Juin	19,49	45 457 383	21 802 488	10 526 424	843 198	10 432 866	Satisfait
Juil.	50,49	117 771 913	21 802 488	13 144 801	809 178	7 848 509	Satisfait
Août	98,85	230 596 621	21 802 488	4 200 582	794 860	16 807 046	Satisfait
Sept.	105,87	246 976 771	21 802 488	3 993 629	804 097	17 004 762	Satisfait
Oct.	67,42	157 269 679	21 802 488	9 403 045	869 727	11 529 715	Satisfait
Nov.	29,74	69 369 116	21 802 488	20 026 638	870 683	12 434 882	Satisfait
Déc.	8,81	20 543 108	20 543 108	21 993 377	921 613	10 063 000	Satisfait

8.5. Analyse de la disponibilité-besoin en eau des retenues de Morrison et Lokpoho en cas de draguage des retenues Lokpoho et Morrison (période 2021-2050)

En cas de draguage, la retenue Lokpoho prévoit 3 mois de déficit hydrique avec un pic de 1 906 597 m³ dans le mois de Février, reflétant la même situation qu'avant le draguage du fond du barrage (Tableau LVI). Cependant, dans ce cas précis, la retenue atteint son volume maximale (volume d'eau lors de la mise en eau de 14 000 000 m³) pendant la période de Mai à Août.

En revanche, la retenue de Morrison indique une réduction de la période de déficit hydrique passant de trois mois avant le draguage à deux mois après draguage du fond de la retenue (Tableau LVII).

Tableau LVI : Rapport disponibilité-besoins en eau de la retenue Lokpoho après draguage

Seuil minimal exploitable 86 208 m³	Apport en eau	Débit prélevable	Volume d'eau dans la cuvette	Volume d'eau évaporé	Besoin en eau	Rapport disponibilité-besoins en eau	Niveau de satisfaction
Mois	m³/s	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	
Janv.	0,10	237 358	237 358	430 559	2 136 939	-1 555 469	Non satisfait
Févr.	0,10	222 213	222 213	429 139	1 699 671	-1 906 597	Non satisfait
Mars	1,15	2 682 720	2 682 720	482 199	2 314 691	-114 170	Non satisfait
Avril	3,63	8 459 122	8 459 122	449 594	2 031 524	5 978 004	Satisfait
Mai	11,36	26 499 028	14 000 000	431 453	1 469 025	12 099 522	Satisfait
Juin	15,72	36 680 947	14 000 000	389 446	739 852	12 870 702	Satisfait
Juil.	12,09	28 208 820	14 000 000	376 536	1 969 292	11 654 172	Satisfait
Août	8,78	20 480 479	14 000 000	370 852	1 966 365	11 662 784	Satisfait
Sept.	5,35	12 489 267	12 489 267	374 438	1 652 851	104 61 978	Satisfait
Oct.	2,79	6 507 759	6 507 759	404 114	1 659 290	44 44 356	Satisfait
Nov.	0,91	2 132 318	2 132 318	403 544	3 256 969	2 916 161	Satisfait
Déc.	0,13	306 279	306 279	425 861	2 021 908	774 671	Satisfait

Tableau LVII : Rapport disponibilité-besoins en eau de la retenue Morrison après draguage

Seuil minimal exploitable 160 344 m³	Apport en eau	Débit prélevable	Volume d'eau dans la cuvette	Volume d'eau évaporé	Besoin en eau	Rapport disponibilité-besoins en eau	Niveau de satisfaction
Mois	m³/s	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	m³/mois	
Janv.	2,74	6 399 887	6 399 887	17 877 736	952 265	125 045 557	Satisfait
Févr.	0,56	1 311 278	1 311 278	16 622 625	959 213	108 774 998	Satisfait
Mars	0,23	541 694	541 694	18 110 996	1 089 806	-18 659 108	Non satisfait
Avril	0,86	2 003 736	2 003 736	13 844 793	1 016 376	-12 857 433	Non satisfait
Mai	5,45	12 706 369	12 706 369	11 478 788	952 222	275 360	Satisfait
Juin	13,71	31 976 267	31 976 267	7 384 782	842 019	23 749 466	Satisfait
Juil.	48,83	113 921 152	80 000 000	10 110 213	808 047	69 081 740	Satisfait
Août	116,50	271 772 142	80 000 000	3 346 720	793 749	75 859 531	Satisfait
Sept.	134,18	313 004 920	80 000 000	3 049 817	802 972	76 147 210	Satisfait
Oct.	84,76	197 734 561	80 000 000	8 341 283	868 511	70 790 206	Satisfait
Nov.	33,03	77 056 421	77 056 421	15 783 659	869 466	131 193 503	Satisfait
Déc.	10,83	25 271 156	25 271 156	18 068 662	920 325	137 475 671	Satisfait

8.6. Discussion

Les levés bathymétriques réalisés au cours de cette étude montrent que les réservoirs de Morrisson et Lokpoho ont une profondeur maximale de 13,33 m et 8,86 m respectivement. Les pentes du fond marin obtenue vont jusqu'à 27° pour la retenue de Morrisson et 14° pour la retenue de Lokpoho. Les courbes hauteur-volume réalisées à partir des levés bathymétriques ont montré qu'à la cote des plus hautes eaux, la capacité en eau de ces retenues est de 29 323 630 m³ pour le réservoir de Morrisson et de 13 352 961 m³ pour le réservoir de Lokpoho. Ainsi, on en déduit que la capacité en eau du barrage Morrisson est plus élevée que celle de Lokpoho. L'analyse des prélèvements actuels dans les retenues de Lokpoho et Morrisson a montré des besoins en eau maximum s'élevant à plus de 3 256 969 m³ dans le mois de Novembre et 18 110 996 m³ en Mars respectivement. En revanche, les prélèvements prédits sur la période 2021-2050 montrent une augmentation des besoins en eau avec un maximum de 3 329 734 et 3 334 426 m³ respectivement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 dans le mois de Novembre pour ceux attribués à la retenue Lokpoho. Au niveau de la retenue Morrisson, les besoins s'élèvent à 22 407 696 et 22 436 396 m³ respectivement selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 dans le mois de Mars. Cette croissance de la demande en eau serait due au réchauffement climatique par l'augmentation de la température engendrant une augmentation de l'évapotranspiration qui, par conséquent accroît la demande en eau des plantes. Assurément, les différents usagers de l'eau à travers leurs effectifs de plus en plus importants telle que les augmentations des superficies des champs de canne à sucre de la SUCAF-CI dont la plus récente en 2022 de 1500 ha pourrait exercer une forte pression sur la ressource en eau se traduisant par l'augmentation de la demande en eau au fil du temps. Aussi, la différence observée au niveau des demandes actuelles et celles de l'horizon 2050 se trouve dans l'analyse des besoins nets considérés pour la culture de canne à sucre. En climat tropical humide comme c'est le cas des complexes sucriers de Ferkessédougou, la canne à sucre consomme par cycle de culture des quantités énormes d'eau d'irrigation allant de 11 000 à 15 000 m³/ha (Pignède *et al.*, 2020).

De façon générale, les ressources en eau mobilisées dans le bassin versant ne couvrent pas ces demandes. L'impact des changements climatiques et de l'occupation des sols projetés sur les précipitations et les débits sont susceptibles d'affecter la disponibilité des ressources en eau et les demandes en eau et par conséquent la performance du système modélisé (bassin versant, réservoir de Lokpoho et Morrisson). Également, l'analyse du fonctionnement des réservoirs face à l'évolution mensuelle des besoins actuels a montré une insatisfaction de la demande en eau sur 3 mois allant de Janvier à Mars pour la retenue de Lokpoho et de Février à Avril pour celle de Morrisson. Il faut noter que ces déficits hydriques pourraient provenir de la baisse des

débits due à l'impact du changement climatique et de la dynamique de l'occupation des sols (Ouedé, 2024) mais aussi, de l'augmentation de la superficie des parcelles de canne à sucre conduisant à une hausse des besoins aussi bien au niveau des cultures que du personnel.

Dans le but d'une meilleure planification des cultures de canne à sucre, une analyse de l'adéquation disponibilité-besoin des ressources en eau a été effectuée sur la période 2021-2050 sur la base de la moyenne des paramètres climatiques (pluie, température, etc.) et hydrologiques (débit) des trois modèles climatiques étudiés. Elle a révélé des insatisfactions de la demande en eau projetée sur la période 2021-2050. Ainsi, selon le scénario RCP4.5, la demande en eau ne sera pas satisfaite sur 4 mois au niveau des deux Barrages hydro-agricoles. Par contre, le scénario RCP8.5 affiche une période d'insatisfaction plus prolongée par rapport au RCP4.5 au niveau du Barrage Lokpoho uniquement. Selon ce scénario, sur la période 2021-2050, les demandes en eau ne seront pas satisfaites sur 6 mois au niveau de la retenue d'eau de Lokpoho et ceux sur la période allant de Janvier à Juillet. En effet, La baisse des débits engendrées par de faibles précipitations simulées et par la dégradation du couvert végétal pourraient être à l'origine des longs mois d'insatisfactions des besoins en eau.

La simulation du rapport disponibilité-besoin en eau après draguage des retenues pour la restauration de leur capacité a montré une réduction du déficit hydrique sur les deux barrages et de la durée de la période d'insatisfaction de la demande en eau. Cependant, le manque d'eau pour les activités des complexes sucriers de Ferkessédougou demeure après draguage.

Conclusion partielle

L'étude bathymétrique réalisée sur les retenues de Morrison et Lokpoho a permis de déterminer leurs caractéristiques morphologiques. Les volumes déterminés à différentes cotes et l'établissement des courbes Hauteur-volume et hauteur surface ont permis d'évaluer le rapport disponibilité-besoins en eau des complexes sucriers de Ferkessédougou. Il en ressort que les retenues de Lokpoho et Morrison ne satisfont pas la demande en eau actuelle sur 3 mois. La situation est encore plus alarmante sur la période 2021-2050 avec l'augmentation de la demande en eau induisant de longues périodes de non satisfaction allant de 4 à 6 mois selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Ces niveaux de satisfaction montrent qu' sur la période 2021-2050, le complexe sucrier de Ferkessédougou pourrait être confronté à des manques d'eau sur au moins 5 mois en moyennes selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude qui a pour objectif général d'analyser la relation entre le changement climatique, la dynamique de l'occupation des sols et la réponse hydrologique dans le temps et dans l'espace sur le Bassin Versant du Haut Bandama à route Korhogo-Badikaha (BVHBKB). L'étude a été organisée autour de quatre objectifs spécifiques. Le premier est de caractériser le changement climatique dans le BVHBKB. Le second est d'évaluer la dynamique de l'occupation des sols sur la période 2021-2050. Le troisième est de simuler l'évolution des ressources en eau sur la période 2021-2050 et le quatrième est de simuler l'adéquation disponibilité-besoin en eau des complexes sucriers de Ferkessédougou sur la période 2021-2050.

En premier lieu, l'étude de la caractérisation du changement climatique a montré sur la période 1986-2016, une baisse générale des précipitations, exceptée la zone de Ferkessédougou. L'étude de l'occurrence des sécheresses pluviométriques à travers les chaînes de Markov a montré une forte influence des événements précédents sur ceux à venir avec une apparition des séquences de sécheresse de plus en plus récurrentes.

La corrélation entre les indices climatiques extrêmes et le rendement de la canne à sucre pluviale présente des coefficients de détermination variant de 46 à 67 %, montrant ainsi que les fluctuations des paramètres climatiques influencent la production de la canne à sucre pluviale. En effet, l'augmentation de R20 mm entraîne une diminution du rendement et vice-versa.

Les modèles climatiques étudiés indiquent, sur la période 2021-2050, une réduction du nombre d'années successives humides tandis que les années successives sèches se feront de plus en plus ressentir. Sur la période 2021-2050, les années successives sèches seront plus récurrentes dans le bassin versant avec des probabilités supérieures à 62 % et 75 % respectivement selon le scénario RCP4.5 et RCP8.5.

La projection future du climat du BVHBKB par les modèles climatiques régionaux CanESM2 et CCLM4 indique une augmentation des températures et une réduction des pluies dans l'ensemble. Cependant, le modèle RCA4 indique une augmentation de la pluviométrie sur la période 2021-2050 dans le BVHBKB.

En second lieu, le traitement des images Landsat TM, ETM+ et OLI TIR respectivement des années 1990, 2006 et 2020 effectué sous ENVI 4.7 a permis d'établir la dynamique d'occupation des sols passés et leur prédiction aux horizons 2035 et 2050 à l'aide du modèle LCM. La dynamique passée (de 1990 à 2016) a montré une importante progression de la superficie des classes de cultures ou jachères (30,44 %), des zones humides (83,10 %) et des bâtis ou sols nus (400,03 %). Contrairement à ces classes, on a une diminution importante des classes de lambeaux de forêt (-48,89 %), des savanes (-14,88 %) et des plans d'eau (-4,80 %).

Les changements de l'occupation des sols observés entre 1990 et 2006 intégrés dans le sous-modèle de transition (LCM) ont montré que la plupart des catégories d'occupation des sols ont des gains et/ou des pertes. A l'exception des classes de bâtis ou sols nus, toutes les autres classes d'occupation des sols perdront en superficie au profit des bâtis ou sols nus sur la période 2021-2050.

En troisième lieu, la modélisation du comportement hydrologique du bassin versant sous l'influence des changements climatiques et de l'occupation des sols à l'aide du modèle SWAT a permis d'apprécier l'impact des paramètres climatiques et de l'occupation des sols sur la ressource en eau. Il en ressort qu'à l'exutoire du bassin versant et à l'entrée du réservoir de Morrisson, les débits ont baissé de 6,79 m³/s sur la période 1986-2016. Les débits à l'entrée de la retenue de Lokpoho sont quasi-stationnaires. Cependant, sur la période 2021-2050, les débits baisseront de 11,27 % et 16,7 % en moyenne à l'exutoire du bassin versant selon le scénario RCP4.5 et RCP8.5 respectivement. Certes les résultats de la modélisation hydrologique avec SWAT ont montré une bonne alimentation des aquifères sur le BVHBKB avec des recharges de la nappe allant de 10 à 12 mm/mois mais, SWAT ne donnent pas le sens d'écoulement souterrain ni les zones de stockages de ces lames infiltrées permettant leurs exploitations.

La modélisation des zones inondables après 5 et 10 jours successifs de pluie et la propagation des crues à différentes périodes de retour du fleuve Bandama dans les périmètres sucriers de Ferkessédougou a permis de connaître les niveaux d'eau et les surfaces inondables.

En ce qui concerne la propagation des crues des cours d'eau à différentes périodes de retour, les cotes de l'eau varient de 292,9 et 300,1 m selon les périodes de retour. Les cotes de l'eau lors de la propagation des crues à différentes périodes de retour varient certes peu d'une période à l'autre mais les superficies inondables par les crues d'une période à l'autre sont considérables. Les cotes maximales de terrains atteintes par l'inondation de 5 et 10 jours consécutives de pluies sont respectivement de 381,01 m et 382,02 m et les superficies inondables sont 546,8 ha et 757,2 ha respectivement.

L'étude du rapport disponibilité-besoins en eau des complexes sucriers de Ferkessédougou a montré que les retenues d'eau de Lokpoho et Morrisson ne parviennent actuellement pas à satisfaire la demande en eau pendant 3 mois. La situation devient encore plus critique sur la période 2021-2050, avec une demande en eau accrue entraînant des périodes d'insatisfaction des besoins pouvant aller en moyenne de 4 à 6 mois selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Ces niveaux de satisfaction indiquent qu'au sur la période 2021-2050, le complexe sucrier de Ferkessédougou pourrait faire face à des déficits hydriques pendant au moins 5 mois en moyenne, selon les deux scénarios.

Pour réduire les répercussions du changement climatique sur l'agriculture et les ressources en eau, des mesures d'adaptation doivent être instaurées conjointement par les autorités publiques et les communautés locales.

En ce qui concerne la pérennisation de la ressource en eau pour l'irrigation des parcelles de canne à sucre des complexes sucriers de Ferkessédougou, il est recommandé de :

- Reconsidérer les périodes de semi de la canne à sucre pour cadrer le cycle végétatif de la plante avec le décalage des saisons sur la période 2021-2050 en ce qui concerne les agriculteurs ;
- Prévoir le dragage des retenues existantes pour restaurer leur capacité de stockage prolongeant ainsi leur durée de vie au niveau des complexes Ferké 1 et 2 ;
- boucher les brèches sur les berges des retenues pour éviter des pertes en eau et la perte de la capacité de stockage ;
- prévoir la construction de nouveau ouvrage de stockage sur d'autres cours d'eau en raison d'une avancée du niveau d'envasement de ceux existants ;
- mettre en place un programme inclusif de reboisement du couvert végétal dans le bassin versant du Haut Bandama en vue de l'atténuation de l'avancer de la sécheresses hydro-climatiques.
- faire recours aux nouvelles variétés de cultures de canne à sucre moins exigeantes en eau et résilientes aux changements climatiques.

Malgré la détermination de la recharge des eaux souterraines, une évaluation des eaux souterraines n'a pas été effectuée dans cette étude. Ainsi, comme perspectives on souhaiterait mener une étude hydrogéologique pour l'identification des aquifères productifs afin de renforcer l'apport en eau pour satisfaire les besoins en eau en toutes périodes de l'année.

RÉFÉRENCES

- Abbaspour K.C. (2013). SWAT-CUP 2012 : SWAT Calibration and Uncertainty Programs A User Manual, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. 103 p.
- Abbaspour K.C. Faramarzi M., Ghasemi S.S. & Yang H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, 45 : p. 1-16.
- Abbaspour K.C. Rouholahnejad E. Vaghefi S. Srinivasan R. Yang H. & Kløve B.A. (2007). Continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524 : p. 733-752.
- Abbaspour K.C. Yang J. Maximov I. Siber R. Bogner K. & Mieleitner J. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333 (24) : 413-430.
- Abdelnour R., Bonardet P., Botta A., Enrione D. & Plane G. (2002). Evénements extrêmes et changement climatique : causes, impacts et moyen de lutte. Rapport Atelier Changements Climatique. Département Environnement, Transport, Ecole des Ponts, Paris (France), 63p.
- Adja M.G. (2009). Etude de l'état hydrique saisonnier du bassin versant de la Bagoué dans un contexte de variabilité climatique. Départements de Boundiali et Tengréla (milieux soudanosahéliens au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en hydrologie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 184 p.
- Agarwal P.K., Bandyopadhyay S.K., Pathak H., Kalra N. & ChanderSand S.K.S. (2000). Analysis of the yield trends of rice-wheat system in north-western India. *Outlook on Agriculture*, 29(4) : 68-259.
- Aguilar E., Aziz-Barry A., Brunet M., Ekan L., Fernandes A., Massoukina M. & Zhang X. (2009). Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114 : 1955–2006.
- Aitkenhead M.J. & Aalders I.H. (2009). Predicting land cover using GIS, Bayesian and evolutionary algorithm methods. *Journal of Environmental management*, 9(1) : 236-250.
- Aka A.O., Kouamé B., Paturel J.E., Servat E., Lubès H. & Masson J.M. (1996). Analyse statistique de l'évolution des écoulements en Côte d'Ivoire. *International Association of Hydrological Sciences*, 238 : 278-287.
- Aké G.E. (2010). Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Science de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 207 p.

- Akgün A., Eronat A.H. & Türk N. (2004) Comparing Different Satellite Image Classification Methods: An Application in Ayvalik District, Western Turkey. *20th ISPRS Congress Technical Commission IV*, 12-23 Juin 2020, Istanbul, Turquie : pp 1091-1097.
- Akyuz D.E., Bayazit M. & Onoz B. (2012). Markov chain models for hydrological drought characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 13 : 298-307.
- Al-Ahmadi F.S. & Hames A.S. (2009). Comparison of Four Classification Methods to Extract Land Use and Land Cover from Raw Satellite Images for Some Remote Arid Areas, Kingdom of Saudi Arabia. *Journal of Earth Sciences*, 20(1) : 167-191.
- Ali A., Lebel T. & Amani A. (2003). Invariance in the spatial structure of sahelian rain fields at climatological scales. *Journal of Hydrometeorology*, 4(6) : 996-1011.
- Amoussou E., Camberlin P. & Mahé G. (2012). Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Ouest Afrique). *Hydrological Sciences Journal*, 57(2) : 1-13.
- Anderson J.R., Ernest E.H., John T.R. & Richard E.W. (1976). A Land Use And Land Cover Classification System For Use With Remote Sensor Data. *Geological Survey Professional Paper*, 964 : 41-56.
- Anoh K.A. (2014). Apport d'un SIG et du modèle agro-hydrologique SWAT dans la gestion durable des ressources en eaux du bassin versant du lac de Taabo (Centre de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët et Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 197 p.
- Anoh K.A., Jourda J.P., Kouamé K.J., Koua T.J., Éba E.A. & Lazar G. (2012). Demarcation of protection perimeters for surface waters of Taabo (Ivory Coast) watershed using GIS and multicriteria analysis. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(12) : 2123-2131.
- Archambeau P. (2006). Contribution à la modélisation de la genèse et de la propagation des crues et inondations. Thèse De Doctorat en hydraulique, Université de Liège (Liège, Belgique), 419 p.
- Ardoin-Bardin S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat en hydroclimatologie, Université de Montpellier 2 (Montpellier, France), 440 p.
- Arnold J.G., Allen P.M. & Bernhardt G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142 : 47-69.
- Arnold J.G., Winchell M. & Srinivasan R. (2012). SWAT : model use, calibration, and validation." *Transactions of the ASABE*, 55(4) : 1491-1508.

- Arnould M. (1961). Étude géologique des migmatiques et des granites précambriens du Nord-Est de la Côte d'Ivoire et de la Haute-Volta méridionale. Bulletin de la direction de la géologie et de la prospection minière, *Direction de la géologie et de la prospection minière*, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 175 p.
- Atkinson P.M. & Tatanall A.R.L. (1997). Neural networks in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4) : 699-709.
- Babykalpana Y. & Thanush K.K. (2010). Supervised/unsupervised classification of LULC using remotely sensed data for Coimbatore city, India. *International Journal of Computer Applications*, 2(7) : 26–30.
- Bärring L. (1993). Climate change or variation? *Climatic Change*, Springer, 25 : 1-14.
- Batty M. (2001) Models in planning: technological imperatives and changing roles. *International Journal of Applied Earth and Geoinformation (Elsevier)*, 3(3) : 252-266.
- Bauwens A., Sohier C. & Degré A. (2013). Impacts du changement climatique sur l'hydrologie et la gestion des ressources en eau du bassin de la Meuse (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 17(1) : 76-86.
- Beniston M. & Stephenson D. (2004). Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 44 : 1-9.
- Bersi M. (2018). Cours de télédétection principes et applications en géosciences. Chapitre 1 . *Institut d'Architecture et des Sciences de la Terre*, Université de Sétif, (Sétif, Maroc), 19 p.
- Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et 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 aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 424 p.
- Biesbrouck B., Wyseure G., Van Orschoven J. & Feyen J. (2002). AVSWAT 2000. Tutorial. Katholieke Universiteit Leuven (K.U.Leuven). *Laboratory for Soil and Water Management (Belgium)*, 199 p
- Bigot S. Brou Y.T., Oszwaid J. & Diedhiou A. (2005). Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales, *Sécheresse*, 16(1) : 5-13.
- Boulahouat N. & Naert B. (1996). Télédétection des ressources en sols des zones arides. *Revue étude et Gestion des sols*, 3(1) : 7-26.
- Bouvier C., Berthelot M. & Janeau J.L. (1987). Campagne de simulation de pluie en milieu urbain. *ORSTOM-CIEH*, Yopougon (Abidjan, Côte d'Ivoire), 16 p.

- Briassoulis H. (1999). Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches. The Web Book of Regional Science, *Regional Research Institute*, West Virginia, 20 p.
- Brou L.A. (2019). Modélisation de la dynamique hydrologique du fleuve Cavally sous l'influence de fortes pressions anthropiques dans la zone de Zouan-Hounien (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en hydrologie, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa, Côte d'Ivoire), 271 p.
- Brunet-Moret Y., Chaperon P., Lamagat J.P. & Molinier M. (1986). Monographie hydrologique du fleuve Niger. *ORSTOM*, 402, Paris (France), 510 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.
- 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.
- Castel T., Xu Y., Richard Y., Pohl B., Cretat J., Thevenin D., Cuccia C., Bois B. & Roucou P. (2010). Désagrégation dynamique haute resolution spatiale du climat du centre-est de la France par le modèle climatique regional ARW/WRF, 23ème colloque de l'association internationale de climatologie, Septembre 2010, Rennes, France, pp 107-112.
- Ceballos A., Martínez-Fernández J. & Luengo-Ugidos M.A. (2004). Analysis of rainfall trends and dry periods on a pluviometric gradient representative of Mediterranean climate in the Duero Basin, Spain. *Journal of Arid Environments*, 58(2) : 215–233.
- CEDEAO-CSAO (2008). Climat et changements climatiques en Afrique de l'Ouest. Atlas de l'Intégration Régionale en Afrique de l'Ouest. CSAO/OCDE, ILSS, FAO, 13 p.
- Cerri C.C., Bernoux M., Feller C., Corrêa de Campos D., Fernando de Luca E. & Eschenbrenner V. (2004). Canne à sucre et séquestration du carbone. *Académie d'Agriculture de France*, Horizon documentation IRD, 15 p.
- Cetin M., Kavzoglu T. & Musaoglu N. (2004). Classification of multispectral, multi-temporal and multi-sensor images using principal components analysis and artificial neural networks: Beykoz case. International Archives of the Photogrammetry. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35 : 951-956.
- Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C. & Latifovic R. (2006). Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie. *Téledétection*, 6(1) : 9-17.

- Chaponnière A. (2005). Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semiaride : cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain). Thèse de doctorat en hydrologie, Institut National Agronomique Paris-Grignon (Paris, Côte d'Ivoire), 268 p.
- Chopard B., Ouared R., Stahl B., Rufenacht DA, Yilmaz H. & Courbebaisse G. (2005). Thrombosis modeling in intracranial aneurysms: a lattice Boltzmann numerical algorithm. *Computer Physics Communications*, 179(3) : 128-131.
- Chow V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGRAW-Hill Classic, New York, 728.
- Christensen J.H., Carter T.R., Rummukainen M. & Amanatidis G. (2007). Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*, 81(1) : 1-6.
- Clarke L., Edmonds J., Jacoby H., Pitcher H., Reilly J. & Richels R. (2007). CCSP synthesis and assessment product 2.1, part a scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations, us government printing office, Washington dc, 154 p.
- Corgne S. (2004). Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif : application à la couverture hivernale des sols en Bretagne. Thèse de doctorat en Géographie, Université de Rennes 2-Haute-Bretagne (Renne, France), 230 p.
- Costa A.C. & Soares A. (2009). Trends in extreme precipitation indices derived from a daily rainfall database for the South of Portugal. *International Journal of Climatology*, 29(13) : 1956-1975.
- Courage K., Masamu A., Bongo A. & Munyaradzi M. (2009). Rural sustainability under threat in Zimbabwe : simulation of future land use/cover changes in the Bindura district based on the Markov-cellular automata model. *Applied Geography*, 29(3) : 435-447.
- Dadhich P.N. & Hanaoka S. (2010). Markov method integration with multi-layer perceptron classifier for simulation of urban growth of Jaipur City: In *10th WSEAS/IASME international conference on electric power systems, high voltages, electric machines, Iwate Prefectural*, 4-6 October 2010, Iwate University, Japan, pp 118-123.
- Dai A. (2011), Drought under global warming : A review, *WIREs Clim.Change*, 2 : 45–65
- Deressa T., Hassan R. & Poonyth D. (2005). Measuring the impact of climate change on south african agriculture: the case of sugarcane growing regions, *Agrekon*, 44 (4) : 524-542.
- Doorenbos J. & Kassam A.E. (1980). Réponse des rendements à. *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage*. Rome FAO, 235 p.
- Dosso S. (2023). Analyse des liens entre variables climatiques et culture de la canne à sucre dans les complexes sucriers de Ferkessédougou. Thèse de Doctorat en Physique-Chimie de l'Atmosphère, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 206 p.

- Driouech F. (2010). Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes. Thèse de Doctorat en climatologie, l'Institut Nationale Polytechnique de Toulouse (Toulouse, France), 164 p.
- Dubois J-M.M., Cavayas F. & Lafrance P. (1991). Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique. Quatrièmes journées scientifiques du Réseau Télédétection de l'UREF, Montréal, 21-23 octobre 1991. Québec, Canada, Presses, Université du Québec (Québec, Canada), pp 17-30.
- Dubreuil V. & Le Dû L. (1997). Etude du couvert végétal (NDVI) par télédétection (NOAA-AVHRR), Participation à l'ouvrage "Le climat, l'eau et les hommes ; Mélanges offerts au Professeur Jean Mounier", Presses Universitaires de Rennes (Rennes, France), 45 p.
- Eastman J.R. (2006). IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing. Worcester, Clark University, 457 p.
- Eastman J.R. (2020). TerrSet geospatial monitoring and modeling system, Tutorial Version 2020v.19.0. Clark University, Worcester, 8 p.
- Eastman R.J. (2003). IDRISI Kilimanjaro Guide to GIS and Image Processing Chapitre 16. Clark University. 26 p.
- Eastman R.J. (2009). IDRISI Taiga: Guide to GIS and Image processing. Clack Lab-Clack University. Manual version 16.02, 342 p.
- Eba A.E., Kouamé K.J., Jourda J.P., Aké G.E., Bachir S.M., Anoh K.A. & Kouakou D.S. (2013). Demarcation of Surface Water Protection Perimeters by Using GIS: Case of Gagnoa Reservoir in West Central of Côte d'Ivoire. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, (4)4 : 1311-1320.
- Edwards E.J. & Smith S.A. (2010). Phylogenetic Analyses Reveal the Shady History of C4 Grasses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(6) : 2532–2537.
- Émilie J. (2014). Causes, impact et projections des sécheresses en Amazonie : une étude numérique des processus et des incertitudes. Thèse de doctorat, Océan, atmosphère et surface continentale, Université de Toulouse (Toulouse, France), 203 p.
- Ersoy A., Yunsel T.Y. & Cetin M. (2004). Characterization of Land Contaminated by Past Heavy Metal Mining Using Geostatistical Methods. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 46 : 162-175.
- Eşbah H., Akif Erdoğan M., & Akın Tanrıöver A. (2011). Cellular automata-Markov chain and landscape metrics for landscape planning. *A/Z Itu Journal Of The Faculty Of Architecture*, 8(02) : 63-79.

- Fang G.H., Yang J., Chen Y.N. & Zammit C. (2015). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in china. *hydrology earth system Sciences*, 9(6) 2547–2559.
- FAO (1986). La conservation des sols et des eaux dans les pays en développement. Bulletin pédologique 33, 98 p.
- FAO (2003). The state of food insecurity in the world. Rome, Food and Agricultural Organisation, 40 p.
- FAO (2018). The future of food and agriculture: Alternative pathways to 2050. Version abrégée, Rome, 64 p.
- Faramarzi M., Abbaspour K.C., Vaghefi S.A. & Farzaneh M.R. (2013). Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. *Journal of Hydrology*, 480 : 85– 101.
- Formal J. (2020). Mise en place du modèle agro-hydrologique SWAT sur un petit bassin versant agricole : application au bassin du Ruiné. Rapport d'étude en Sciences de l'environnement, (Charente, France), 89 p.
- Fossou N.R., Soro T.D., Orou K.R., Onetie Z.O. & Lasm T. (2017). Variabilité climatique et son incidence sur l'occupation des sols : cas de la région du N'zi, Centre-Est de la Cote d'Ivoire en Afrique de l'Ouest. *Afrique Science* 13(4) : 337-348.
- Fossou R.M.N., Lasm T., Soro N., Soro T., Soro G., Lasme D.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.
- Fowe T. (2015). Simulation et optimisation du fonctionnement du barrage de Boura en zone soudanienne du Burkina Faso. Thèse de Doctorat en sciences et technologie de l'eau, de l'énergie et de l'environnement, Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'environnement (Ouagadougou, Burkina Faso), 313 p.
- Franklin S.E., Hall R.J., Moskal L.M., Maudie A.J. & Lavigne M.B. (2000). Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, 21 : 61-79.
- Franquin P., 1968. Analyse agroclimatique en région tropicale : les conditions hydriques. s. 1 : Cahier ORSTOM, Série biologique, 5 : 15-23
- Frei C., Christensen J.H., Déqué M., Jacob D., Jones R.G. & P.L.V. (2003). Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the european Alps. *Journal of geophysical research*, 108(3) : 1-19.

- Frei C., Schöll R., Fukutome S., Schmidli J. & Vidale P. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of geophysical research*, 111(6) : 1-20.
- Frich P., Alexander L.V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Tank A.M.G. & Peterson T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19(3) : 193-212.
- Frinelle B.G. & Moody A. (2001). Mapping Continuous Distributions of Land Cover : A Comparison of Maximum-Likelihood Estimation and Artificial Neural Networks. *Journal of Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(6) : 693-705.
- Fujino J., Nair R., Kainuma M., Masui T. & Matsuoka Y. (2006). Multigas mitigation analysis on stabilization scenarios using aim global model. *The Energy Journal Special*, 3 : 343-354.
- Gao J. & D. Skillcorn. (1998). Capability of SPOT XS data in producing detailed land-cover maps at the urban rural periphery. *International Journal of Remote Sensing*, 19 : 2877-2891
- Géomine (1982). Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Carte géologique de la Côte d'Ivoire, *cahier n°3*: 20 p.
- Gholami A., Esfadiari M. & Masihabadi M.H. (2010). The Survey and the Comparison of Maximum Likelihood, Mahalanobis Distance and Minimum Distance Methods in Preparing Land use Map in the Western Part of Isfahan Province. *Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 64 : 69-72.
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Genève, Suisse), 64 p.
- GIEC (2008). Le changement climatique et l'eau, document technique du GIEC, 237 p.
- GIEC (2012). Résumé à l'intention des décideurs. *In* : Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.K., Allen S.K., Tignor M. & Midgley P.M. (Eds.), État de New York (États-Unis d'Amérique), 19 p.
- GIEC (2014). Changements climatiques 2014 : Impact, adaptation et vulnérabilité. Partie A : aspects mondiaux et sectoriels. Contribution du groupe de travail II au 5e rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University press, Cambridge United Kingdom et New York Ny, USA, 1132 p.
- Giorgi F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letter* 33(8) : 1-4.

- Godard O. (2006). L'effet du changement climatique et du réchauffement global sur la planète. Rapport Stern sur l'économie du changement climatique, Royaume-Uni, 700 p.
- Goula B.T.A., Kouassi V.J. & Savané I. (2006). Impacts du changement climatique sur les ressources en eau en zone tropicale humide : cas du Bandama en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 18(1) : 1-11.
- Goula B.T.A., Kouassi W.F., Fatika V., Kouakou K.E. & Savané I. (2009). Impacts du changement climatique et de la variabilité climatique sur les eaux souterraines en zone tropicale humide : cas du bassin versant de la Comoé. *International Association of Hydrological Sciences*, 334 :190-202.
- Graham J., Nosek B.A., Haidt J., Iyer R., Koleva S., & Ditto P.H. (2011). Mapping the moral domain. *Journal of Personality and Social Psychology*, 101(2) : 366–385.
- Griffiths R.B. (2010). Stochastic Processes. Lecture Notes on Quantum Mechanics. *AcademicPress*, 8(3) : 1-10.
- Guan M., Rawson D.M. & Zhang, T. (2010). Cryopreservation of zebrafish (*Danio rerio*) oocytes by vitrification. *Cryo letters*, 31(3) : 230-238.
- Guerra L. (2010). Comparison Between Supervised and Unsupervised Classifications of Neuronal Cell Types : A Case Study. Wiley Periodicals, Inc. *Develop Neurobiol*, 71 :71-82.
- Gupta H.V., Sorooshian S. & Yapo P.O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrology and Engineering*, 4(2) : 135-143.
- Hagemann S., Chen C., Haerter J.O., Heinke J., Gerten D. & Piani C. (2011). Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models. *Journal of hydrometeorology*, 12 : 556-578.
- Hasmadi M. (2009). Evaluating supervised and unsupervised techniques for land cover mapping using remote sensing data. *Malaysian Journal of Society and Space*, 5(1) : 1-10.
- HEC-RAS. (2016). HEC RAS Rivers Analysis System. Hydraulic reference Manual version 6.3.1. *US Army Corps of Engineers*, (Etas Unis, Amérique), 538 p.
- Hegerl G.C., Crowley T.J., Hyde W.T. & Frame D.J. (2006). Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries, *Nature*, 440 : 1029-1032.
- Hepinstall J.A., Marzluff J.M. & Alberti M. (2008). Modeling the responses of birds to predicted changes in land cover in an urbanizing region. In: Millspaugh J.J., Thompson F.R. III (eds) *Models for planning wildlife conservation in large landscapes*. Elsevier Science, Burlington, 8 : 625-659.

- Hirsch C. (2007). *Fundamentals of computational fluid dynamics*. Charles Hirsch. 1, Elsevier/Butterworth-Heinemann, 656 p.
- Hostache R. (2006). *Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique*. Thèse de Doctorat en Sciences de l'eau, Ecole nationale du génie rural des eaux et des forêts, (Montpellier, France), 257 p.
- Huang D.J., Li H.F. & Inohaec T. (2010). Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. *Ecological Modelling, Elsevier/Science Direct*, 222 : 3761-3772.
- Hubert-Moy L. (2006). *Occupation des sols et Télédétection : de l'inventaire à la modélisation prédictive*, *Habilitation à Diriger des Recherches*, Université Rennes, dir. Marchand 19 p.
- Hughes D.A., Kingston D.G. & Todd M.C. (2011). Uncertainty in water resources availability in the okavango river basin as a result of climate change, *hydrology and earth system sciences*, 15 : 931-944.
- Hunsigi G. (2012). *Production of Sugar cane : Theory and Practice*. Advanced Series in Agricultural Sciences 21, Bangalore (Inde), 91 p.
- Hydrologic Engineering Center (1998). *HEC-1 : Flood Hydrograph Package-User's Manual*, CPD-1A., Version 4.1, 434 p.
- Ibrahim B. (2012). *Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé*. Thèse de doctorat, UPMC (France) et 2iE (Burkina Faso), 250 p.
- INS (Institut National de la Statistique) (2021). *Recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) Résultats globaux*. INS (Abidjan-côte d'Ivoire), 22 p.
- IPCC (2000). *Emissions Scenarios, special report of IPCC Working Group III*, 27 p.
- IPCC (2001). *Climate change 2001*. In Houghton J., Ding Y., Griggs D., Noguer M., Van der Linden P. & Xiaosu D. (Eds.) : *The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 944 p.
- IPCC (2008). *Technical Paper, Climate Change and Water*, Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds. IPCC Secretariat, Geneva, 210 p.
- IPCC (2012). *Summary for policymakers*. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G-K.,

- Allen, S.K., *et al.*, Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2012, 21 p.
- Islam M.S. & Ahmed R. (2011). Land Use Change Prediction In Dhaka City Using Gis Aided Markov Chain Modeling. *Journal of Life and Earth Science*, 6 : 81-89.
- Jobin B., Latendresse C., Maisonneuve C., Sebbane A. & Grenier M. (2007). Changements de l'occupation du sol dans le sud du Québec pour la période 1993-2001. Série de rapports techniques du service canadien de la faune, Direction générale de l'intendance environnementale (Québec, Canada), 128 p.
- Jourda J.P.R. (2006). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissures de l'Afrique de l'Ouest. Concept de l'Hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat en Sciences Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 429 p.
- Kaboré E., Nikiema M., Ibrahim B. & Helmschrot J. (2015). Merging historical data records with MPI-ESM-LR, CANESM2, AFR MPI and AFR 44 scenarios to assess long-term climate trends for the Massili basin in central Burkina Faso. *International journal of current engineering and technology*, 3(5) : 1846-1852.
- Khaldi A. (2005). Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien "Monts de Tlemcen – Saida. Thèse de doctorat en hydrogéologie, Université d'Oran (Oran, Algérie), 239 p.
- Kingumbi A. (2006). Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation : cas du Merguellil en Tunisie centrale. Thèse de Doctorat en hydrologie, Université de Tunis El Manar (Tunis, Tunisia), 218 p.
- Knutti R. & Sedláček J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3 : 369-373
- Koffi Y.B., Lasm T., Ayrat P.A., Anne J., Kouassi A.M., Assidjo E. & Biemi J. (2007). Optimization of Multi-layers Perceptions models with algorithms of first and second order. Application to the modelling of rainfall-rainoff relation in Bandama Blanc catchment (Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 17(3) : 13-328.
- Konan B. (2002). Modélisation et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Sassandra (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat en hydrologie, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 146 p.
- Koné M., Douffi K.G-C., Silue S.S., Soro F.A., N'guessan y.J., Koffi I. & Coulibaly L. (2020). Cartographie de l'occupation des sols et dynamique des anacardiés de la sous-préfecture

- de Napié, au nord de la Côte d'Ivoire, *Journal of Research in Environmental and Earth Sciences*, 6 : 35-46.
- Koua T.J.J. (2014). Apport de la modélisation hydrologique et des systèmes d'information géographique (SIG) dans l'étude du transfert des polluants et des impacts climatiques sur les ressources en eau : cas du bassin versant du lac de Buyo (sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université Félix Houphouët Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire), 229 p.
- Kouadio Z.A. (2011). Dynamique de l'Occupation des sols et du Comportement Hydrologique : Cas des Bassins Versants Cotiers de l'Agnéby et du Boubo (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en hydrologie, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 198 p.
- Kouakou K.E., Goula B.T.A. & Savane I. (2007). Impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire-Burkina Faso). *European Journal of Scientific Research*, 16(1) : 31-43.
- Kouakou K.K. (2011). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest : cas du bassin versant de la Comoé. Thèse de Doctorat en hydrologie, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 206 p.
- Kouamé J. (2003). Rôle de la jachère améliorée à légumineuses arbustives dans la stabilisation de la culture d'ignames en zone de forêts dégradées. *Agronomie Africaine*, 4 : 147-152.
- Kouamé K.J. (2007). Contribution à la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) du district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution. Thèse de Doctorat en hydrologie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 225 p.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Saley M.B. & Biemi J. (2013). Application du modèle de maillet à l'étude des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant du N'Zi-Bandama (Cote d'Ivoire). *Journal of Asian Scientific Research*, 3(2) : 214-228.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Saley M.B. & Koffi Y.B. (2007). Identification of trends in the rainfall runoff relation and refill of the aquifers in a hydroclimatic context: case study of the N'zi (Bandama) catchment in Ivory Coast. *European Journal of Scientific Research*, 16(3) : 412-428.
- 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 H.K., Kouadio Z.A., N'go Y.A., Koffi B. & Ouédé G.B. (2021). Modeling the Propagation of Flood Waves at the Mouth of the Comoé River in Grand-Bassam (South East of Côte d'Ivoire). *International Journal of Environment and Climate Change*, 11(1) : 33-42.
- Kouassi K.L., Kouadio Z.A., Kouamé Y.M., Yao A.B., Ouedé G.B. & Kouadio K.P. (2019). Run-of-river dam designing and modelling of its influence on the propagation of floods from the Davo River to the drinking water production station in Guéyo (Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 28(1) : 241-253.
- Lana X. & Burgueno A. (1989). Daily dry-wet behaviour in Catalonia (NE Spain) from the viewpoint of Markov chains. *International Journal of Climatology*, 18 :793-815.
- Landgrebe D. (2002). Hyperspectral image data analysis as a high dimensional signal processing problem. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(1) : 17-28.
- Landis J.R. & Koch G.G. (1997). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 1 :159-174.
- Lazri M., Ameer S. & Haddad B. (2007). Analyse de données de précipitations par approche markovienne. *Larhyss Journal*, 6 : 7-20.
- Leboeuf A. & Paquet A. (2013). Guide d'interprétation des mosaïques d'images satellitaires Landsat. Secteur des Forêts, *Ministère des Ressources naturelles*, Quebec, 22 p.
- Lévesque E., Lamontagne L., Griensven A.V., Vanrolleghem P.A. & Anctil F. (2008). Méthodologie pour l'adaptation de données physiographiques canadienne au modèle de qualité de l'eau SWAT «soils water assessment tool». *Revue génie sciences environnementale*, 7 : 453-466.
- Li J. & Heap A.D. (2014) Spatial Interpolation Methods Applied in the Environmental Sciences : *Environmental Modelling & Software*, 53 : 173-189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- Lisson S.N., Bamber-Inman N.G., Robertson M.J. & Keating B.A. (2005). The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research*, 92 : 321-335.
- López E., Boccoa G., Mendoza M. & Duhau E. (2001). Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe A case in Morelia City, Mexico. *Landscape Urban Planning, Elsevier/Science Direct*, 55(4) : 271–285.
- López-Moreno J.I., Vicente-Serrano S.M., Zabalza J., Bagueña S., Lorenzo-Lacruz J., Azorin-Molina C. & Morán-Tejeda E. (2013). Hydrological response to climate variability at different time scales : A study in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, 477 : 175-188.

- Lu D. & Weng Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5) : 823-870.
- Luck M. & Wu J. (2002). A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA. *Landscape Ecology*, 17 : 327-339
- Manandhar R. (2009). Improving the Accuracy of Land Use and Land Cover Classification of Landsat Data Using Post-Classification Enhancement. *Journal of Remote Sens*, 1 : 330-344.
- Mann H.B. & Whitney D.R. (1947). On a Test of Whether One of Two Random Variables is Stochastically Larger Than the Other. *Journal of Statistical Computing and Simulation*. 13 : 41-48.
- Maraun D., Wetterhall F., Ireson A.M., Chandler R.E., Kendon E.J., Widmann M., Brienen S., Rust H.W., Sauter T., Venema V.K.C., Chun K.P., Goodess C.M., Jones R.G., Onof C., Vrac M., Office M., & Centre H. (2010). Precipitation downscaling under climate change. Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of geophysics*, 48(3) : 1-38.
- Martiné J-F., Bernard-Colombat J.L., Jumaux G. (2012). Variabilité et évolution de la teneur en sucre de la canne à La Réunion, impact des facteurs climatiques et importance du changement climatique. In : La canne à sucre source de développement et d'innovation. Congrès sucrier ARTAS-AFCAS, 10-14 septembre 2012, Saint Denis, La Réunion et du 15 au 19 septembre 2012 à Maurice (France), 5 : 7 p.
- Mather P.M. (2004). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Chichester, 442 p.
- McGuffie K. & Henderson-Sellers A. (2001). Forty years of numerical climate modelling, *International Journal of Climatology*, 21(9) :1067-1109.
- McKee T.B., Doesken N.I. & Kleist I. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Acte of the 8th conference on applied climatology* (Anateim, californie), 17-22 January 1993, pp 179-184.
- Mélèdje N.D.H., Kouassi K.L., N'Go Y. & Savane I. (2015). Caractérisation des occurrences de sécheresse dans le bassin hydrologique de la Bia transfrontalier entre la Côte d'Ivoire et le Ghana : contribution des chaînes de Markov. *Cahiers Agriculture*, 24(3) : 186-97.
- Ministère des Ressources Animales et Halieutiques (2014). *Plan strategique de developpement de l'élevage, de la pêche et de l'aquaculture en Côte d'Ivoire (PSDEPA 2014-2020)*. Tome I : Diagnostic – Stratégie de développement – Orientations, 102 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.
- Morel J. (2014). Estimation de la biomasse de canne par modélisation et télédétection. Application à la Réunion. Thèse de doctorat en Océanographie, Université de la Réunion (Réunion, France), 154 p.
- Moriasi A.V.L. & Bingner H.V. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the Asabe* 50(3) : 885-900.
- Moron V. (1994). Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'atmosphère. Thèse de Doctorat en Géographie et Climatologie, Centre de recherches de Climatologie. Université de Bourgogne (Bourgogne, France), 219 p.
- N'Tcha M.Y. (2018). Evaluation de l'impact des changements climatiques et des changements d'utilisation / occupation des terres sur les ressources en eau du bassin de l'Oueme à Beterou sur la période 2021-2050. Thèse de Doctorat en Hydro-climatologie, Ecole Doctorale Polytechnique de l'INP-HB de Yamoussoukro (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 197 p.
- Nalbantis I. & Tsakiris G. (2009). Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resources Management*, 23(5) : 881–897.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R. & Williams J.R. (2011). Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation, version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory-Agricultural Research Service. Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 618 p.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R. & Williams J.R. (2002). Soil and Water Assessment Tool User's Manual, version 2000, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, TWRI Report, 192 p.
- Nghiem V-T, Nedjai R & Messaoud N.N. (2011). The consequences of changes in forest land cover in the Alpine and Jurassic massifs on the physico-chemical status of deep lake waters. *Journal of Alpine Research*, 99(3) : 12-27.
- Nghiem V-T. (2014). Impact du changement du mode d'occupation des sols sur le fonctionnement hydrogéochimique des grands bassins versants : cas du bassin versant de l'Ain. Thèse de Doctorat en Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, Université de Grenoble (Grenoble, France), 306 p.
- Nghiem V-T., Nedjai R., Le V-A & Charleux L. (2013). Application of GIS and remote sensing for predicting land-use change in the French Jura Mountains with the LCM model: the

- impact of variables on the disturbance model, *Proceeding of the 34th Asian Conference on Remote Sensing*, 20-24 October 2013, Bali, Indonesia, pp 2588–2595.
- Niang F.A., Fati A., Thiam M., Kané A., Pastori M. & Carmona C. (2021). Détermination de scénario d'occupation du sol dans le contexte du changement climatique dans le bassin versant du fleuve Sénégal. *International Journal of Scientific And Engineering research*, 12(3) : 9-20.
- Oñate-Valdivieso F. & Sendra J.B. (2010). Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land-use scenarios for hydrological modelling. *Journal of Hydrology, Elsevier*, 395 : 256-263.
- ONERC (2012). Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement. Version pour une diffusion électronique. Edition assurée par *La documentation Française*, 200 p.
- Oszwald J. (2005). Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000) : Suivi par télédétection et développement d'une approche cartographique. Thèse de doctorat en géographie, Université des Sciences et Technologies de Lille (Lille, France), 304 p.
- Ouedé G.B., Kouadio Z.A., Yao A.B., Kouassi K.L. & Diédihou A. (2023). Evaluation à long terme de l'impact de la dynamique de l'occupation des sols sur les écoulements dans le bassin versant du Haut Bandama (Nord Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 67(2) : 302-323.
- Ouedraogo M. (2016). Caractérisation des aquifères de socle pour l'amélioration de la productivité des forages d'hydraulique villageoise dans le bassin versant du Bandama blanc amont. (Nord de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Géophysique. Université Paris Saclay (Paris, France), 242 p.
- Pagani V., Stella T., Guarneri T., Finotto G., Van Den Berg M., Marin F.R., Acutis M. & Confalonieri R. (2017). Forecasting sugarcane yields using agro-climatic indicators and canegro model: A case study in the main production region in brazil. *Agricultural Systems*, 154 : 45–52.
- Parker D.C., Manson S.M., Janssen M.A., Hoffmann M.J. & Deadman P. (2003). Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2) : 316-340.
- Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Lubès H., Ouedraogo M. & Masson J.M. (1997). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea, Part II: an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 191 : 16-36,

- Payan J.L. (2007). Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit. Thèse de Doctorat en Science de l'eau, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts CEMAGREF, (Paris, France), 257 p.
- Péné B.C. & Tuo K. (1996a). Utilisation du diagnostic hydrique pour le pilotage optimal de l'irrigation de la canne à sucre en Côte, d'Ivoire. *Sécheresse*, 7(4) : 299-306.
- Péné B.C. & Tuo K. (1996b). Corrélation eau-rendement en culture de canne à sucre : cas du complexe sucrier de Ferké 2 pour deux campagnes agricoles. *Agronomie Afrique*, 8(2) : 97-111.
- 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) : 87-9.
- Péné, C.B. & Assa, A.D. (2003). Variations interannuelles de la pluviométrie et de l'alimentation hydrique de la canne à sucre en Côte d'Ivoire, *Sécheresse*, 14 ; 43-52, <https://doi.org/10.1029/2005JD006289>, 2003.
- Perraud A. (1971). Les sols in le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, pp. 269-390.
- Perrin C. (2002). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche*, 6(7) : 84-91.
- Perumal K. & Bhaskaran R. (2010). Supervised classification performance of multispectral images. *Journal of Computing*, 2 : 124-129.
- Piani C., Haerter J.O. & Coppola E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, *Theoretical and Applied Climatology*, 99 : 187-192.
- Pignède E., Roudier P., Diedhiou A., Hermann V., Kobéa A. & Péné B.C. (2020). Prévion des rendements de canne à sucre en Côte d'Ivoire à l'aide de variables météorologiques et satellitaires, Working Paper, Agence française de développement, 40 p.
- PNUD (2004). La réduction des risques de catastrophes : un défi pour le développement. New York : Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), Bureau pour la Prevention des Crises et du Relèvement (BPCR), 18 p.
- PNUE (2004). Land degradation in drylands (LADA): GEF grant request. Programme des Nations Unies pour l'environnement, Nairobi, 32 p
- Pontius J.R.G. & Cheuk M.L. (2006). A generalized cross-tabulation matrix to compare soft classified maps at multiple resolutions. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(1) : 1-30.

- Pontius J.R.G., Cornell J. & Hall C. (2001). Modeling the spatial pattern of land-use change with Geomod2 : application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(3) : 191-203.
- Renaud J. (2004). Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube (Haute-Savoie) : Vers une modélisation des transferts de phosphore, 75 p.
- Riahi K., Gruebler A. & Nakicenovic N. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7) : 887-935.
- Richards J.A & Jia X. (2006). Remote Sensing Digital Image Analysis, Book of Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 454 p.
- Rogan J. & Chen D. (2004). Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in Planning*, 61 : 301-325.
- Saley M.B. (2003). Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi-montagneuse de man (Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Hydrogéologie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 209 p.
- Samba G. & Mpounza M. (2005). Application du processus de Markov sur les occurrences des précipitations journalières au Congo-Brazzaville. *Géoscience de surface*, 337(15) : 1355-1364.
- Santhi C., Kannan N., Arnold J.G. & Di Luzio M. (2008). Spatial calibration and temporal validation of flow for regional-scale hydrologic modeling. *Journal of American Water Resource Association*, 44(4) : 829-846.
- Sarr M.A., Seidou O., Tramblay Y. & El Adlouni S. (2015). Comparison of downscaling methods for mean and extreme precipitation in Senegal. *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 4 : 369-385.
- Savané I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information géographique à référence spatiale. Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles. Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 332 p.
- Savané I., Coulibaly K.M. & Gion P. (2001). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de man. *Sécheresse*, 12(4) : 231-237.
- Sawadogo Z. (2020). Simulation et optimisation du fonctionnement d'un petit barrage et de son périmètre rizicole irrigué : cas de nanan à Yamoussoukro. Thèse de Doctorat en Hydraulique

- Agricole et Hydrologie, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 243 p.
- Serrano S.M., Beguería S. & López-Moreno J.I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration. *Journal of Climate*, 23 : 1696-1718.
- Servat E., Paturel J.E., Kouamé B., TRavaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.F., Lubes-Niel H., Fritsch J.M., Masson J.M. & Marieu B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. *IAHS Publication*, 252 : 323-337.
- Servat E., Paturel J.E., Lubes N.H., Kouame B., Masson J.M., Travaglio M. & Marieu B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2) : 363-387.
- Seto K.C. & Fragkias M. (2005). Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landscape Ecology*, 20 : 871-888.
- Sharpley A.N. & Williams J.R. (1990). EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. United States Department of Agriculture Bulletin, 68 p.
- Silva E. & Clarke K. (2002). Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26 : 525-552.
- Smith R.B. (2012). Tutorial : Introduction to remote sensing of the environment, 32 p.
- Sneyers R. (1990). On the statistical analysis of series of observations. Technical Note No. 143 WMO N°415, *World Meteorological Organization*, Geneva, 192 p.
- Soro G.E. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en Sciences et Gestion de l'environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Soro G.E., Anouman D.G.L., Goula bi T.A., Srohorou B. & Savane 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 T.D., Soro N., Oga Y.M-S., Lasm T., Soro G., Ahoussi K.E. & Biemi J. (2011). La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carre de

- grandLahou (sud-ouest de la Côte d'Ivoire), *Géographie physique et environnement*, 5 : 55-75.
- Soro (2014). Evolution des ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité et de changement climatiques : impacts hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques. Thèse de Doctorat en hydrogéologie, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 276 p.
- Speers D.D. (1995). SSARR Model. In: V.P. Singh (Editor), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, pp 367-394.
- Stewart W.J. (1994). *Introduction to the Numerical Solution of Markov Chains*. Princeton, NJ: Princeton, 123 p.
- Stokes G. (1845). On the theories of the internal friction of fluids in motion. *Mathematics and Physics Papers*, 1 : 75-129.
- Stow D. (2004). Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems. *Journal of Remote Sensing of Environment*, 89 : 281-308.
- SWAT (2012). Arcswat interface for SWAT 2012, user's guide. Blackland Research And Extension Center Texas Agrilife Research. Grassland, Soil Andwater Research Laboratory. USDA Agricultural Research Service, 464 p.
- Taylor K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of geophysical research*, 106(7) : 7183-7192.
- Teutschbein C. & Seibert J. (2010). Regional climate models for hydrological impact studies at the catchment scale: a review of recent modeling strategies. *Geographic Compass*, 4(7) : 834-860.
- Thiébault M. (2010). Modélisation hydrologique d'un scénario de changement climatique sur le bassin versant du Bani avec SWAT. Mémoire de stage de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES, 55 p.
- Tiémoko D.T., Yoroba F., Diawara A., Kouadio K. & Kouassi B.K. (2020a). Understanding the local carbon fluxes variations and their relationship to climate conditions in a sub-humid savanna-ecosystem during 2008-2015: Case of Lamto in Côte d'Ivoire. *Atmospheric and Climate science*, 10(2) : 186-205.
- Tiemoko D.T., Yoroba F., Paris J-D., Diawara A. & Berchet A. (2020b). Source–receptor relationships and cluster analysis of CO₂, CH₄, and CO concentrations in West Africa: The case of Lamto in Côte d'Ivoire. *Atmosphere*, 11(9) : 903-919.
- Tong T.Y.S. & Naramngam S. (2007). Modeling the impacts of farming practices on water quality in the little Miami river basin. *Environmental Management, Springer*, 39 : 853-866.

- Tso B. & Mather P.M. (2001). *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. London : Taylor & Francis, Angleterre, 352 p
- Turc L. (1953). Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. Thèse en agronomie, Institut national de la recherche agronomique (Paris, France), 253 p.
- Turc L. (1961). Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle. *Annales. Agronomiques*, 12(1) : 13-49.
- UNESCO-WMO (2012). *International glossary of hydrology*. Genève 2. WMO N°385, 469 p.
- Van Griensven A., Meixner T., Grunwald S., Bishop T., Diluzio M. & Srinivasan R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models, *Journal of Hydrology*, 324 : 10-23.
- Van Vuuren D.P.J., Edmonds M., Kainuma K., Riahi A., Thomson K., Hibbard G.C., Hurtt T., Kram V., Krey J.F., Lamarque T., Masui M., Meinshausen N., Nakicenovic S.J. & Smith S.K. (2011). The Representative Concentration Pathways : an overview. *Climatic Change*, 109 : 5-31.
- Varado N. (2004). Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée. Application au bassin versant de la Donga, au Bénin. Doctor Thesis, Institut national polytechnique de Grenoble (France), 55p
- Vernier F., Galichet B. & Leccia O. (2013). MODCHAR Définition des scénarios d'évolution des pratiques agricoles et modélisation des impacts des pressions agricoles dans le bassin versant de la Charente. IRSTEA de Cestas, France, 100 p.
- Wetterhall F. (2012). Conditioning model output statistics of regional climate model precipitation on circulation patterns. No 2012. *Nonlinear processes geophysics*, 19 : 623-633.
- Wilks S. (2004). *Statistical Methods in the atmospheric sciences second edition*. *International geophysics series*, 624 p.
- Xiong L. (2002). Supervised Classification and Unsupervised Classification. ATS 670 Class Project Report, 12 p.
- Yacouba H., Da D.E.C., Yonkeu S., Zombre P. & Soule M. (2002). Caractérisations du ruissellement et de l'érosion hydrique dans le bassin supérieur du Nakambe (Burkina Faso). In 5^{ème} conférence Inter-régionale sur l'environnement et l'eau, Ouagadougou 5-8 Novembre 2020, (Burkina Faso), pp 318-325.
- Yapo A.L.M., Diawara A., Kouassi B.K., Yoroba F., Sylla M. B., Kouadio K., Tiémoko D.T., Koné D.I., Akobé, E.Y., & Yao K.P.A.T. (2020). Projected changes in extreme precipitation

-
- intensity and dry spell length in Côte d'Ivoire under future climates, *Theoretical Applied Climatology*, 140 : 871–889, <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03124-4>.
- Yates R.A. (1998). Growth analysis as a diagnostic tool for sugarcane. *Sugar Cane*, 4 : 3-12.
- Yéo W.E. (2017). effects of climate change and human activities on water resources in the comoe river basin (west africa). Doctoral thesis, in *Climate Change and Water Resources of the University of Abomey-Calavi (Abomey, Benin)*, 167 p.
- Youan T.M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, en télédétection et SIG, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 243 p.
- Zagbaïh S., Berti F. & Lebailly P. (2006). Impact de la dynamique cotonnière sur le développement rural. Etude de cas de la région de Korhogo, au Nord et au Centre de la Côte d'Ivoire. *Biotechnologie Agronomie Société Environnement*, 10, (4) : pp. 325-334
- Zhang X. & Yang F. (2004). RCLimDex 1.0, User Manual. Climate Research Branch Environment, Downsview (Ontario, Canada), 23 p.

ANNEXES

Annexe 1 : Matériel de terrain : Bouteille hydrologique (A), GPS portatif Garmin (B), Ben Van Veen (C), Hors-bord (D), Débit mètre OTTQliner 2 (E) et Echosondeur Elite 9 Ti (F)



Annexe 2 : Mesure de débit sur le Bandama à l'aide du débitmètre OTT Qliner2



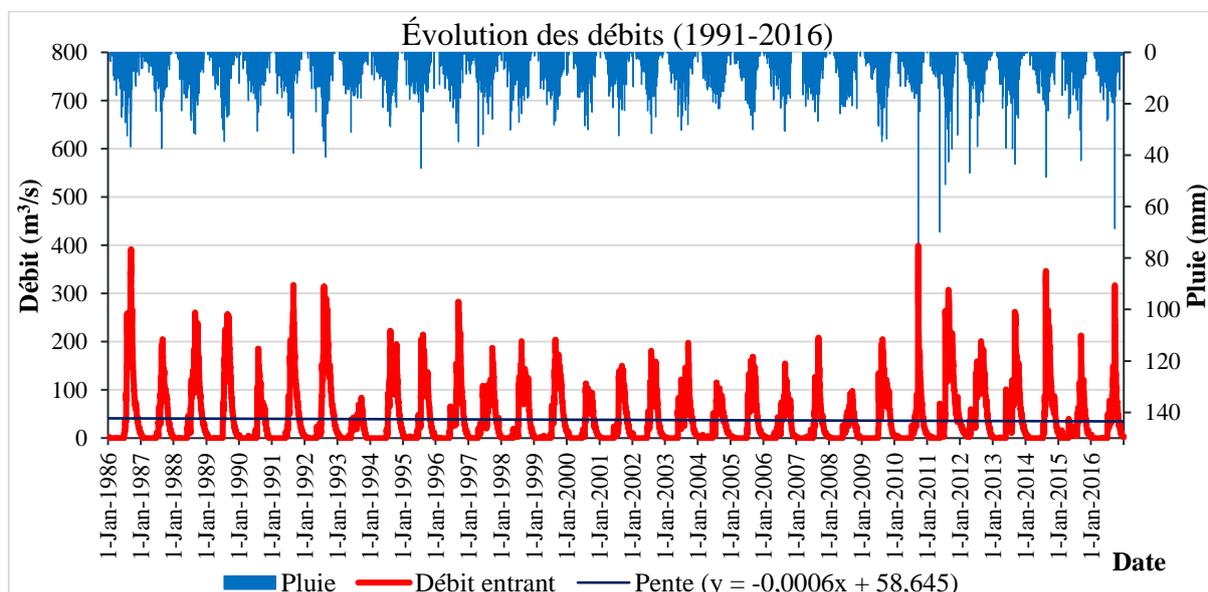
Annexe 3 : Détermination des épaisseurs de sédiment dans les retenues

Pour déterminer la profondeur d'ensablement par endroit, des sondages ont été effectués à l'aide d'une tarière en période de basse eau dans les retenues de Morrison et Lokpoho.



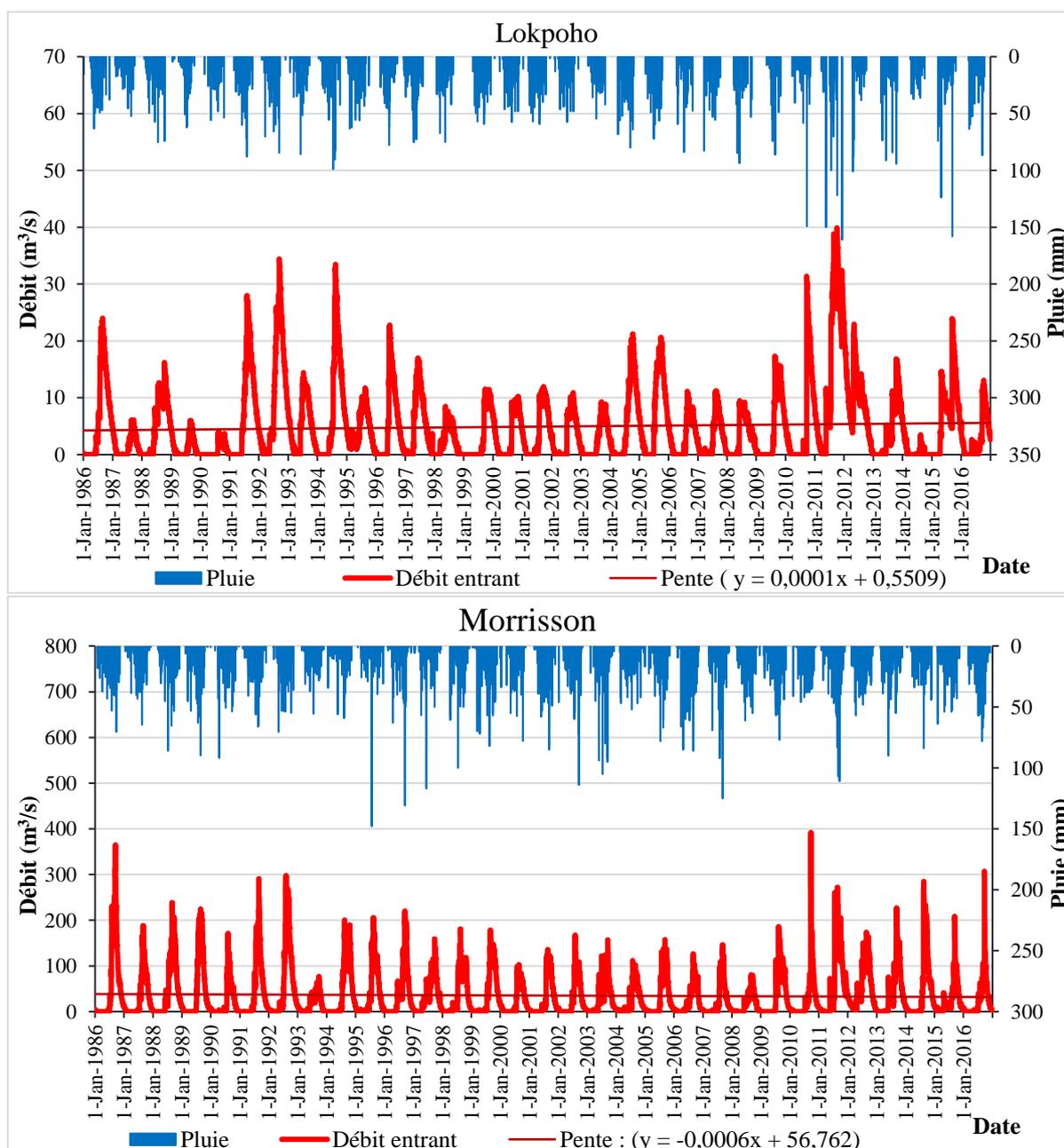
Annexe 4 : Évolution journalière des débits à l'exutoire du bassin versant (1991-2016)

La figure ci-dessous montre l'évolution des débits journaliers simulés à l'exutoire du bassin versant sur la période 1986-2016. Sur cette figure, les débits sortants du bassin versant diminuent de $0,0006 \text{ m}^3/\text{s}$ par jour équivaut à une regression de $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$ par an soit une baisse de $6,79 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1991-2016.



Annexe 5 : Évolution journalière des débits à l'entrée des réservoirs de Morrison et Lokpoho sur la période 1986-2016

La figure ci-dessous montre l'évolution des débits journaliers à l'entrée des retenues de Morrison et Lokpoho sur la période 1986-2016. Sur cette figure, les débits entrants dans la retenue de Lokpoho sont pratiquement stationnaires (pente ≈ 0) tandis qu'on assiste à une diminution des débits entrants dans la retenue de Morrison (pente < 0) sur la période 1986-2016. Cette régression est de $0,0006 \text{ m}^3/\text{s}$ par jour équivaut à $0,22 \text{ m}^3/\text{s}/\text{an}$ et de $6,79 \text{ m}^3/\text{s}$ sur l'ensemble de la période 1986-2016.



PUBLICATIONS

Evaluation à long terme de l'impact de la dynamique de l'occupation des sols sur les écoulements dans le bassin versant du Haut Bandama (Nord Côte d'Ivoire)

[Long-term evaluation of the impact of land use dynamics on runoff in the Haut Bandama watershed (Northern Ivory Coast)]

Ouede Gla Blaise¹, Kouadio Zilé Alex¹, Yao Affoué Berthe¹, Kouassi Kouakou Lazare¹, and Diedihou Arona²

¹Geoscience et environnement, Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

²Institut de Recherche et de Développement (IRD), Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Land use changes are mainly driven by human activities and climate change. Uncontrolled land use can alter surface runoff and affect several sectors of activity such as agriculture, hydropower, drinking water supply, sanitation, etc. The main objective of this study is to assess the influence of changes in land surface conditions on runoff in the Haut Bandama catchment. For this purpose, LANDSAT satellite images from 1990, 2006 and 2020 were used. These images were processed by the maximum likelihood supervised classification method under ENVI to establish the land use maps. Based on the past land use trends, a future prediction (2035 and 2050) is made using the Land Change Modeler. The diachronic analysis of the land use maps for the period 1990-2020 showed a decline in the area of forest and savannah patches, followed by that of water bodies. Conversely, the area of built-up and bare land as well as crops and fallow land is increasing. The same dynamics are predicted for the 2035 and 2050 horizons, where the savannah class dominates most of the net changes. The dynamics of the land surface condition has led to an increase in the runoff coefficient from 1990 to 2020 from 18.5% to 30.7% respectively. This evolution continues until 2050 with 34.5% in 2035 and 36.4% in 2050.

KEYWORDS: Land use, runoff, LCM, Upper Bandama catchment, Ivory Coast.

RESUME: Les changements d'occupation des sols ont pour principaux facteurs les activités anthropiques et le changement climatique. La non maîtrise du mode d'occupation des sols peut modifier les écoulements de surface et affecter plusieurs secteurs d'activité tels que l'agriculture, l'hydroélectricité, l'approvisionnement en eau potable, l'assainissement, etc. Cette étude a pour objectif principal d'évaluer l'influence des mutations de l'état de surface du sol sur le ruissellement du bassin versant du Haut Bandama. Pour ce faire, des images satellitaires LANDSAT de 1990, 2006 et 2020 ont été utilisées. Ces images ont été traitées par la méthode de classification supervisée du maximum de vraisemblance sous ENVI pour établir les cartes d'occupation du sol. Sur la base des tendances d'occupation des sols passées, une prédiction future (2035 et 2050) est faite à l'aide du modèle Land Change Modeler. L'analyse diachronique des cartes d'occupation des sols de la période 1990-2020 a permis d'observer une régression de la superficie des lambeaux de forêts et de savanes, suivie de celle des plans d'eau. A l'inverse, la superficie des bâtis et sols nus ainsi que des cultures et jachères sont en augmentation. Cette même dynamique est prédite aux horizons 2035 et 2050 où la classe de savane est prépondérante dans la plupart des changements nets. La dynamique de l'état de surface des sols a entraîné une augmentation du coefficient de ruissellement de 1990 à 2020 qui passe de 18,5% à 30,7% respectivement. Cette évolution se poursuit jusqu'à l'horizon 2050 avec 34,5% en 2035 et 36,4% en 2050.

MOTS-CLEFS: Occupation des sols, ruissellement, LCM, bassin versant du haut Bandama, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Le constat est le même partout, les ressources naturelles que disposent la terre sont de plus en plus menacées par les changements climatiques et les pressions humaines. Les aires protégées, qui regorgent la plupart du temps d'importantes valeurs naturelles et culturelles, subissent d'énormes pressions anthropiques qui dégradent leur intégrité [1].

Bien qu'il existe des facteurs naturels favorisant la dynamique des milieux comme les variations du couvert végétal l'homme à travers ses différentes activités en est depuis un certain moment le principal déclencheur de la transformation dont font actuellement objet les écosystèmes [2].

L'Afrique subsaharienne, particulièrement la Côte d'Ivoire doit en grande partie son économie à l'agriculture. Pour subvenir à leurs besoins croissants, les populations rurales, pauvres dans leur majorité, n'ont d'autres choix que d'étendre leurs zones de culture au détriment des zones boisées qui ont un rôle multiple. A savoir l'atténuation du changement climatique par la séquestration du carbone, la protection des sols contre les facteurs de l'érosion éolienne et hydrique, la conservation des habitats naturels et bien d'autres services écosystémiques [3]. Cette pression va encore augmenter avec la forte croissance démographique, la nécessaire croissance de la production agroalimentaire, le développement industriel et l'amélioration des conditions de vie des populations [4]. Au Nord de la Côte d'Ivoire, précisément dans le bassin versant du Haut Bandama, la Sucrerie d'Afrique-Côte d'Ivoire (SUCAF-CI) et la coopérative des planteurs de canne à sucre villageoise de Ferkessedougou veulent étendre leurs superficies agricoles pour juguler l'insatisfaction de la demande nationale en sucre. La culture de la canne à sucre est l'une des principales activités des populations du bassin versant du Haut Bandama. Pour un bon développement, les cultures en général et particulièrement la canne à sucre ont fortement besoin d'eau et de température optimale [5] dont les fluctuations sont tributaires de la dynamique des milieux [6]. Ainsi, l'étude de la dynamique de l'occupation des sols et de son impact sur les écoulements à travers l'analyse diachronique multi-dates des cartes d'occupation du sol et de l'évolution des coefficients de ruissellement s'avère de plus en plus indispensable, à la fois pour la connaissance d'un territoire et pour son aménagement [7]. Cette étude a pour objectif d'analyser les mutations de l'état de surface du sol et d'évaluer son influence sur la réponse hydrologique du bassin versant du Haut Bandama à long terme.

2 PRÉSENTATION 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°00' et 6°16'Ouest et les latitudes 9°09' et 10°15' Nord (Figure 1). Il s'étend sur les régions du Poro, du Tchologo et une partie de la Bagoué avec une superficie estimée à 9 688 km² et représente environ 10% du bassin versant entier du Bandama. Les principales activités menées dans cette partie de la Côte d'Ivoire sont l'agriculture (canne à sucre, maraîchers etc.), l'exploitation minière (mine d'or de Tongon etc.) et la pêche.

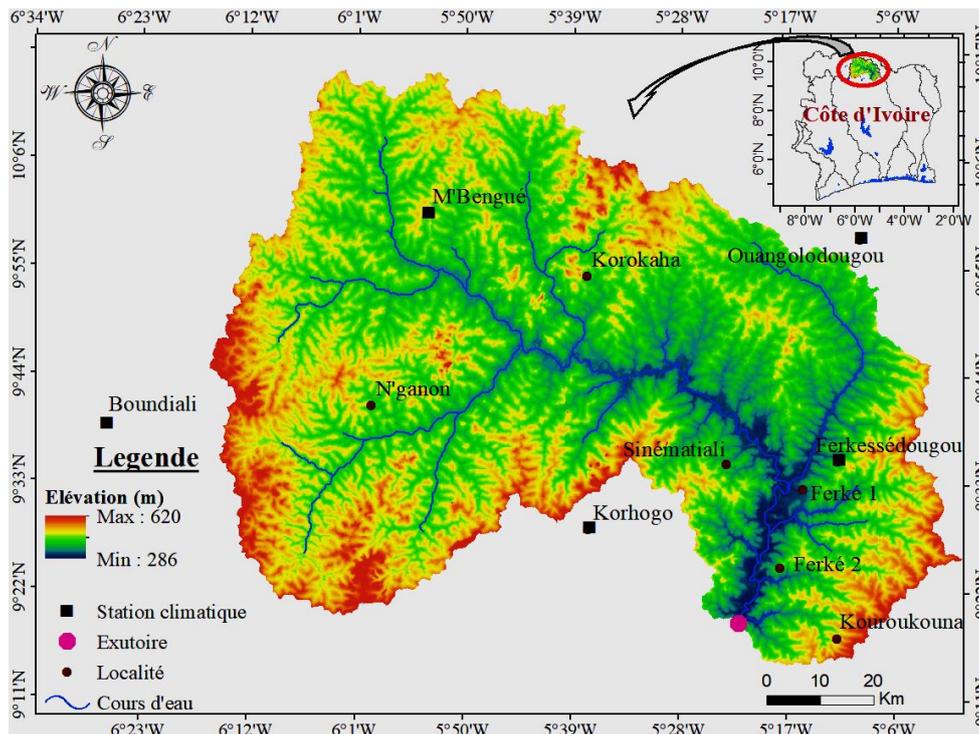


Fig. 1. Bassin versant du Bandama blanc

Le bassin versant du Haut Bandama est sous l'influence du régime tropical de transition caractérisé par deux saisons [8]: une saison des pluies d'avril à octobre avec des précipitations moyennes mensuelles variant entre 127,6 et 248 mm, une saison sèche de novembre à mars avec des pluies moyennes mensuelles variant entre 1,9 et 49 mm. Les températures moyennes mensuelles varient entre 25°C en Août et 29°C en Avril (Figure 2). Le bassin versant abrite des complexes sucriers appartenant à l'entreprise Agroalimentaire SUCAF-CI créés en 1997 à la suite du programme de restructuration et de privatisation du secteur sucrier ivoirien. La SUCAF-CI est composée de deux sucreries (Ferké 1 et Ferké 2) situées à 40 km l'une de l'autre. La production du sucre de canne provient aussi bien des plantations industrielles (12 000 ha) que des plantations villageoises (2 500 ha).

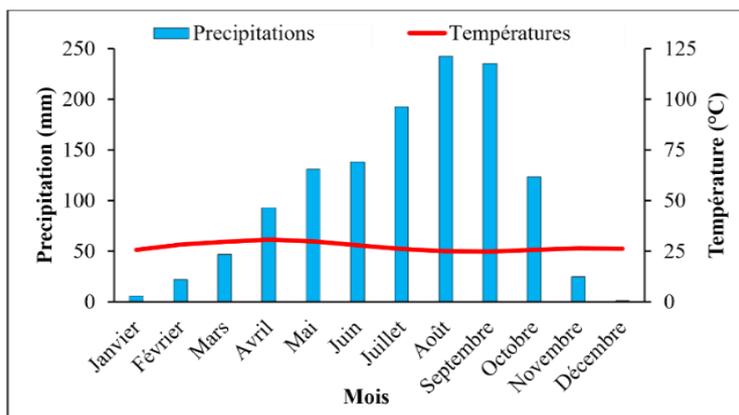


Fig. 2. Diagramme ombrothermique sur la période 1986-2016

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 MATÉRIEL

Le matériel utilisé est constitué d'un GPS (*Global Positioning System*), pour enregistrer les coordonnées géographiques; un appareil photo numérique pour les prises de vues sur le terrain. Les logiciels utilisés sont: ENVI (*Environment for Visualizing*

Images) pour le traitement numérique des images satellitaires, Land Change Modeler pour les prédictions et les applications SIG (Systèmes d'Information Géographique) et ArcGis pour les réalisations cartographiques.

Les données utilisées concernent les images Landsat TM, ETM+ et OLI TIR de résolution spatiale 30 m respectivement des années 1990, 2006 et de 2020 pour la cartographie (tableau 1) et la quantification de la dynamique de l'occupation des sols. Ces images sont téléchargées sur le site internet Earthexplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Un modèle numérique de terrain (MNT) a été également téléchargé sur ce site pour la détermination des variables explicatives.

Tableau 1. Caractéristiques des images satellitaires utilisées

Capteur	Résolution	Bandes spectrales	Longueur d'onde
Landsat ETM Landsat ETM+ Landsat 8 OLI+	30	2- Vert (visible)	0,52 - 0,60
	30	3- Rouge (visible)	0,63 - 0,69
	30	4- Infrarouge proche	0,76 - 0,90
	30	5- Infrarouge moyen 1	1,55 - 1,75
	30	6- Infrarouge moyen 2	1,566 - 1,651

3.2 MÉTHODES

3.2.1 DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS SUR LA PÉRIODE 1990-2020

- **Prétraitement**

Le mosaïquage s'est avéré nécessaire étant donné que la zone d'étude est couverte par 3 scènes d'images Landsat (197-053, 197-054 et 198-053 correspondant à la même période). Il a consisté à juxtaposer les bandes identiques des scènes entre elles pour former une plus grande. Les images ont d'abord été rehaussées dans le but d'uniformiser les teintes des bandes spectrales [9]. Le secteur d'étude est extrait à partir des images mosaïquées.

- **Traitement**

Des compositions colorées ont été réalisées en combinant les bandes 4-3-2 des images Landsat TM et 6-5-4 pour les ETM+ et OLI TIRS. L'objectif est d'avoir une synthèse d'informations pour une bonne discrimination des unités d'occupation des sols [10]. De plus, l'interprétation visuelle des images permettra d'établir la relation entre le terrain et l'image dans l'identification des différentes classes sur les images. La connaissance du secteur d'étude a guidé le choix de la méthode de classification en faveur de la classification supervisée.

- **Classification supervisée**

Dans la méthode de classification supervisée, les parcelles d'entraînement sont définies par les RDI (Régions D'Intérêts). Les RDI sont des portions d'images sélectionnées par l'utilisateur. Chaque RDI représente une catégorie thématique qui peut comprendre un ou plusieurs échantillons. Ces derniers sont les clés d'interprétation des images. Ils sont déterminés sur la base des données d'observation, des données auxiliaires et des connaissances de l'analyseur pour la zone d'étude. Les étapes de la démarche de classification de l'occupation des sols sont détaillées à la figure 3.

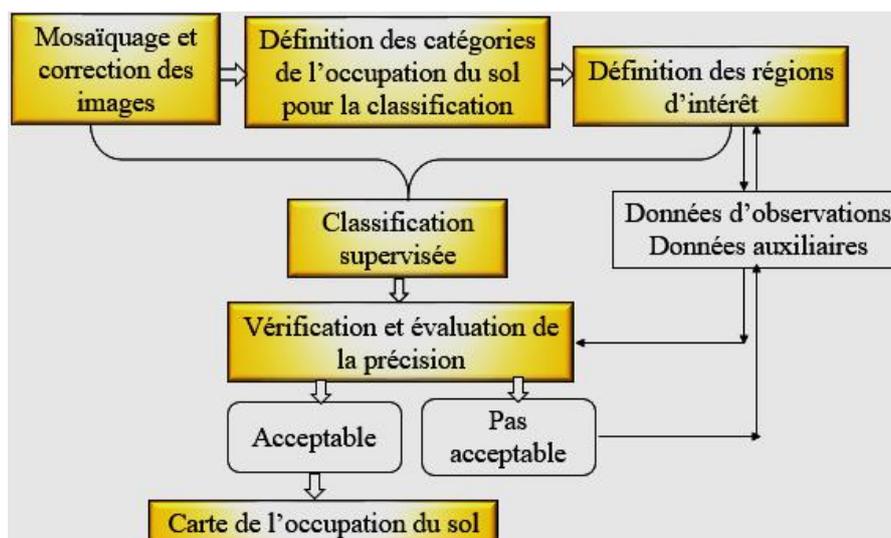


Fig. 3. Organigramme de la méthode de classification de l'occupation des sols

- **Calcul du taux d'évolution**

La dynamique de chaque catégorie d'occupation des sols sera appréciée en calculant le taux d'évolution $E_{(i,k)}$ des superficies d'occupation des terres. Soit S_i la superficie d'une catégorie d'occupation des terres de l'année i et S_k , celle d'une catégorie d'occupation des terres de l'année k , avec $k > i$ et $E_{(i,k)}$ se calcule selon l'équation 1:

$$E_{(i,k)} = \frac{S_k - S_i}{S_i} \times 100 \quad \rightarrow (1)$$

Si $E_{(i,k)} = 0$, on conclut qu'il y a stabilité de cette catégorie d'occupation des terres;

Si $E_{(i,k)} < 0$, on conclut qu'il y a régression de cette catégorie;

Si $E_{(i,k)} > 0$, il y a extension ou évolution de cette catégorie.

La tendance spatiale de l'occupation des terres est évaluée avec l'outil de tendance spatiale de Land Change Modeler. Elle consiste à cartographier la conversion d'une ou plusieurs classes à une autre (à travers les indices de transition) suivant une fonction polynomiale. Land Change Modeler utilise une fonction polynomiale du troisième degré pour cartographier les indices de transition de chaque classe [11].

- **Validation des résultats de la classification de l'occupation des sols**

La validation des cartes réalisées est effectuée par comparaison des résultats classifiés de l'occupation des sols avec les données de références (observations de terrain) et également par une analyse des précisions. Le résultat de la classification est considéré comme acceptable si le pourcentage du nombre total de pixels correctement classifiés est supérieur à 85%. De même le coefficient Kappa doit être supérieur à 0,80 [12].

- **Modélisation prédictive de l'occupation des terres aux horizons 2035 et 2050**

Le changement de l'occupation des sols est un résultat de l'interaction complexe entre les facteurs physiques et humains [13] et [14]. Les changements historiques sont d'abord déterminés à partir d'une série multi-temporelle de cartes de l'occupation des sols (carte de 1990 et 2006). Puis, les facteurs les plus significatifs appelés variables explicatives (tableau II) dans ces changements sont déterminés. Ces changements historiques et les sources d'informations décrivant les variables explicatives sont intégrés pour modéliser l'évolution de l'occupation des sols avec la régression logistique (ReLog) ou le Perceptron Multi-Couche (PMC). La troisième étape consiste à appliquer la chaîne de Markov afin de produire une prédiction à court, moyen et long terme de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama. La dernière étape consiste à valider le modèle en comparant la carte prédictive (carte simulée 2020) à celle réelle (carte observée 2020) pour la même date. Les

étapes de la modélisation prédictive de l'occupation des sols à l'aide du module LCM sont donc structurées selon la figure 4 ci-dessous.

Tableau 2. Variables explicatives pour la modélisation prédictive

	Type de données	Description et source
Cartes historiques	Cartes d'occupation des sols de 1990, 2006 et 2020	Réalisées à partir des images Landsat de 1990, 2006 et 2020
Variables explicatives	Carte de distance aux cours d'eau	Définie à partir du réseau hydrographique
	Carte de distance au réseau routier	Définie à partir du réseau routier
	Carte de distance aux localités	Définie à partir des zones urbanisées
	Carte du relief	A partir du MNT
	Carte de pente	A partir du MNT

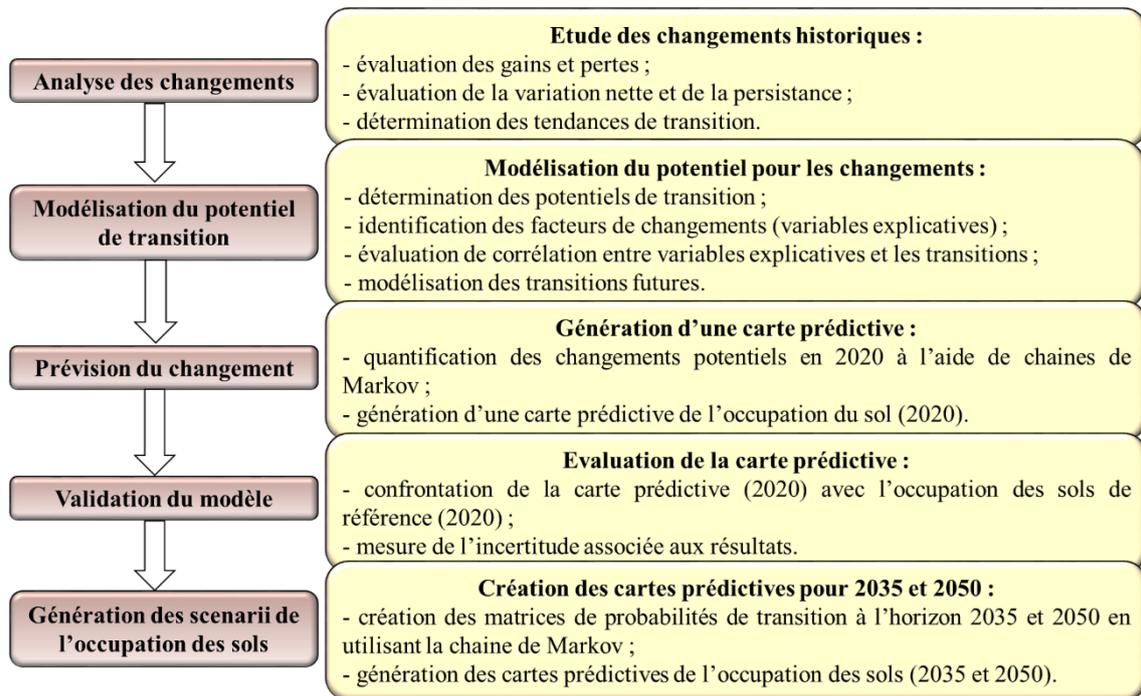


Fig. 4. Etapes de la prédiction de l'occupation des sols à l'aide de LCM [15]

3.2.2 ÉVALUATION DE L'IMPACT DE LA DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE L'OCCUPATION DES SOLS SUR LES ÉCOULEMENTS

L'impact de la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols a été appréhendé à travers l'évolution du coefficient de ruissellement. Le coefficient de ruissellement représente le rapport de la fraction d'eau de la pluie ruisselée par rapport à l'eau précipitée. Il est fonction de l'état de surface et de l'importance des précipitations. Les coefficients de ruissellement (K_{ri}) établis par les auteurs tels que [16], [17] and [18] sur des bassins versants expérimentaux en fonction des catégories d'occupation des sols sont utilisés. Ensuite, à chaque état de surface, un coefficient de ruissellement est attribué tenant compte de la connaissance approfondie de la zone d'étude. Le coefficient de ruissellement moyen annuel du bassin versant du Haut Bandama est ensuite déterminé par pondération des surfaces des classes d'occupation des sols à partir de l'équation 2:

$$K_r = \frac{\sum K_{ri} A_i}{\sum A_i} \rightarrow (2)$$

Avec:

K_{ri}: coefficient de ruissellement de l'état de surface i

A_i : Superficie occupée par la classe d'occupation du sol i dans le bassin versant

K_r : Coefficient de ruissellement moyen annuel du bassin versant

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 RÉSULTATS

4.1.1 VALIDATION DES RÉSULTATS DE LA CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DES SOLS

La matrice de confusion pour l'évaluation de la classification de l'occupation des sols de 1990 montre qu'au total 1 197 pixels de l'image sont évalués (tableau III). Parmi ces pixels, 1 148 pixels de la carte de 1990 sont en accord avec ceux de l'image de référence, soit une précision globale d'environ 95,9 %.

Tableau 3. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 1990

1990		Données de référence						Précision (%)	
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide	Plan d'eau		Total
Données classifiées	Lambeau de forêt	132	0	1	0	10	0	143	92,3
	Savane	0	175	0	4	1	4	184	95,11
	Culture ou jachère	17	0	59	0	0	0	76	77,63
	Bâti ou sol nu	0	0	0	119	0	0	119	100
	Zone humide	0	0	0	0	216	11	227	95,15
	Plan d'eau	0	0	0	0	11	447	458	97,59
	Total	149	175	60	123	228	462	1 197	

En ce qui concerne la classification de l'occupation des sols de 2006, un ensemble de 1 484 pixels a été testé pour évaluer sa précision dont 1 471 pixels sont bien classifiés soit une précision globale de 99,12 % (Tableau IV).

Tableau 4. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 2006

2006		Données de référence						Précision (%)	
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide	Plan d'eau		Total
Données classifiées	Lambeau de forêt	227	0	0	0	0	3	230	98,6
	Savane	0	244	0	0	0	0	244	100
	Culture ou jachère	0	0	213	0	0	0	213	100
	Bâti ou sol nu	0	0	0	286	0	0	286	100
	Zone humide	0	0	0	0	177	9	186	95,16
	Plan d'eau	0	0	0	0	1	324	325	99,69
	Total	227	244	213	286	178	336	1 484	

La matrice de confusion et la précision individuelle des catégories d'occupation des sols de 2020 sont consignées dans le tableau V. Dans ce tableau, 1 466 pixels classifiés sont comparés avec ceux de l'image de référence. Parmi eux, 1 436 pixels soit environ 97,95 % des pixels sont en bon accord.

Tableau 5. Matrice de confusion pour la classification de l'occupation des sols de 2020

2020		Données de référence						Précision (%)	
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide	Plan d'eau		Total
Données classifiées	Lambeau de forêt	303	0	0	0	0	1	304	99,67
	Savane	2	225	0	14	0	1	242	92,97
	Culture ou jachère	0	0	263	0	0	0	263	100
	Bâti ou sol nu	0	0	0	329	0	1	330	99,69
	Zone humide	0	0	0	2	97	3	102	95,09
	Plan d'eau	0	0	0	0	6	219	225	97,33
	Total	305	225	263	345	103	225	1 466	

Le tableau VI présente les précisions globales et les coefficients Kappa obtenus à partir des résultats d'analyse des matrices de confusion. Les précisions globales et les coefficients de Kappa des cartes réalisées sont supérieurs à la valeur recommandée (de 85% et 0,80 respectivement) qui sont dans l'ordre de 0,94 à 0,98. Les précisions obtenues permettent de dresser les cartes de l'occupation des sols pour les années 1990, 2006 et 2020 (respectivement figure 5, Figure 6 figure 7).

Tableau 6. Précision globale des cartes de l'occupation des sols

Occupation du sol	1990	2006	2020
Précision globale (%)	95,90	99,12	97,95
Coefficient Kappa	0,95	0,99	0,98

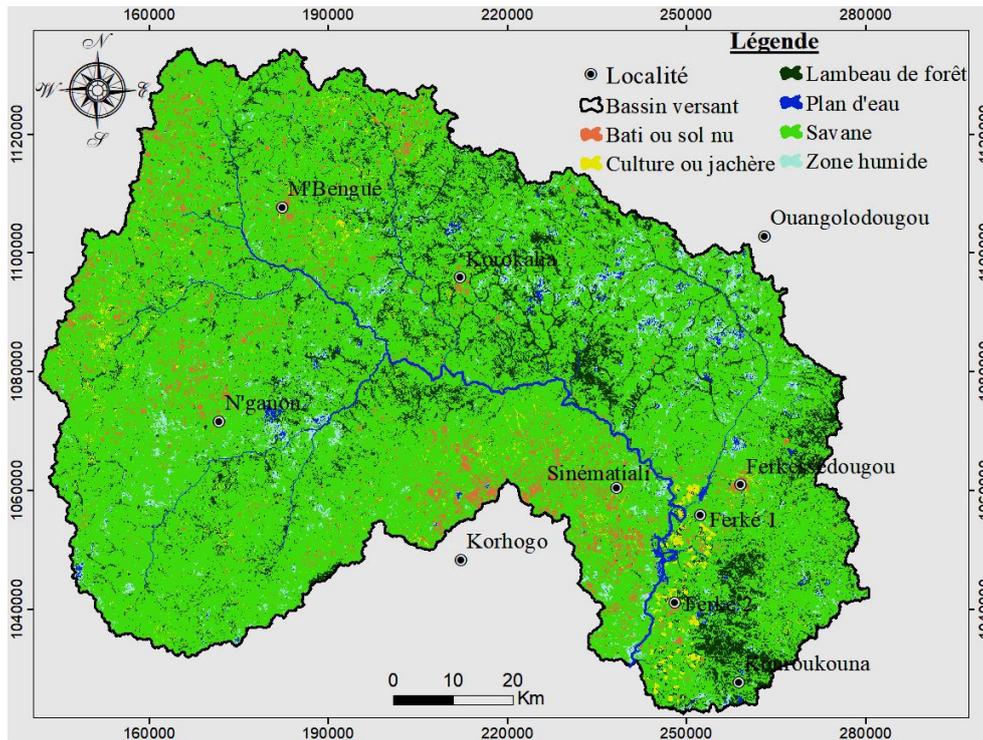


Fig. 5. Cartes de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama de 1990

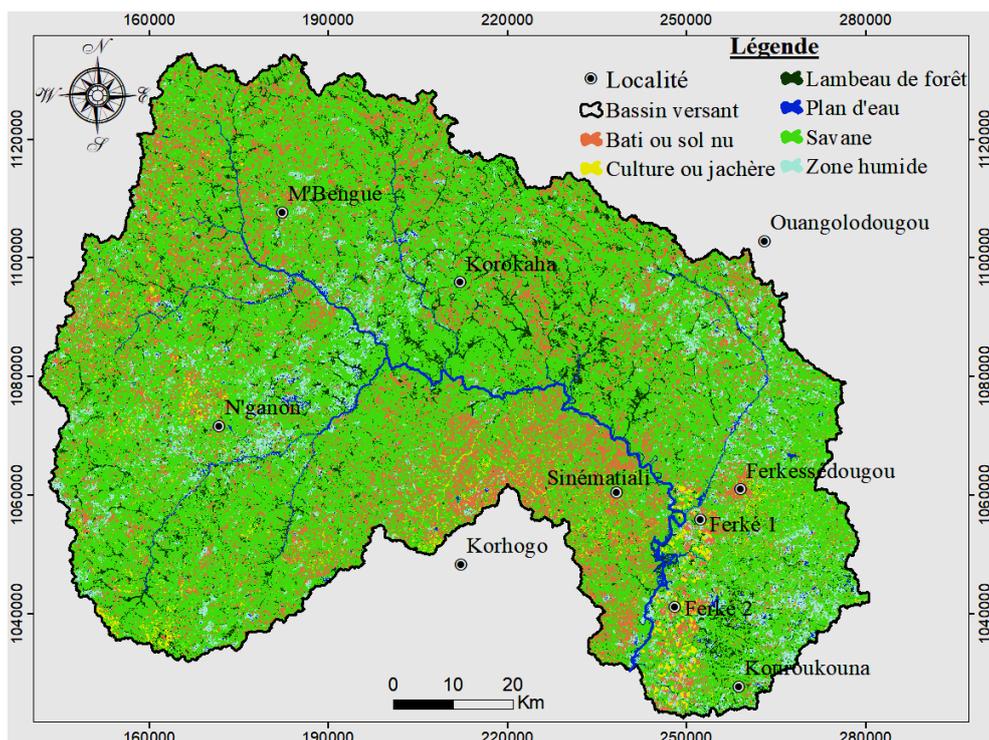


Fig. 6. Cartes de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama de 2006

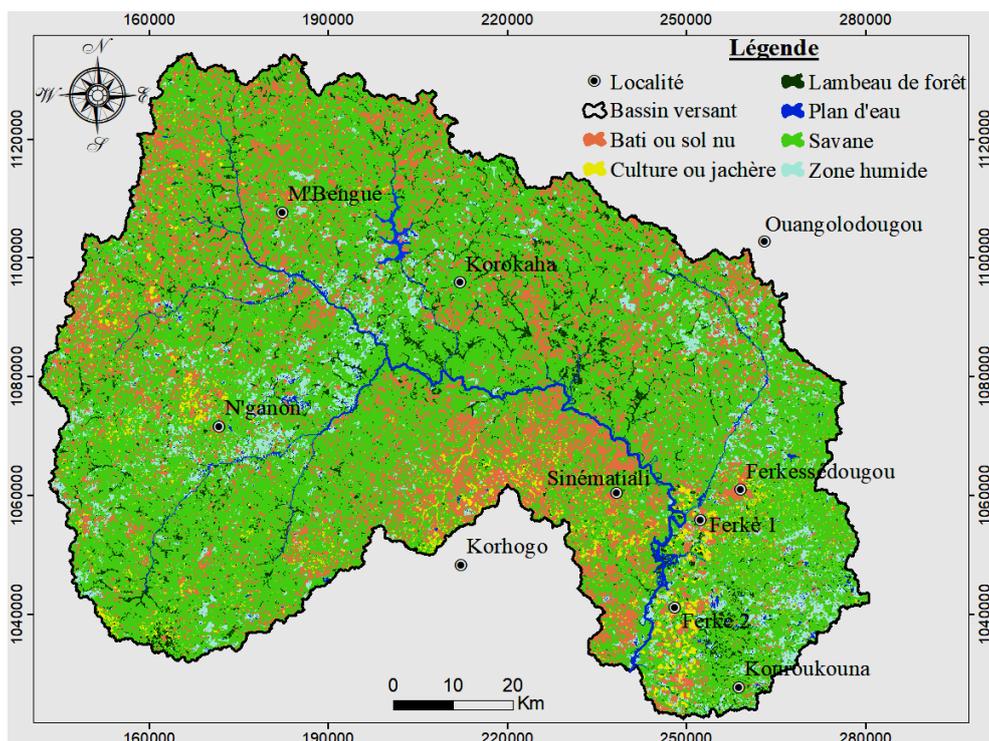


Fig. 7. Cartes de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama de 2020

4.1.2 ANALYSE DIACHRONIQUE DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS

• Dynamique de l'occupation des sols de la période 1990-2006

Les pourcentages de changement observés entre 1990 et 2006 montrent que les classes de culture ou jachère, des zones humides et des bâtis ou sol nu, présentent une importante progression (Tableau VII). Les autres changements sont relativement importants tels que la diminution des surfaces des lambeaux de forêt (-48,89 %), des savanes (-14,88 %) et des plans d'eau (-4,80 %).

Tableau 7. Changement de l'occupation du sol entre 1990-2006

	1990	2006	Gain et perte (km ²)	Gain et perte (km ²) (%)
Lambeau de forêt	1034,08	528,48	-505,6	-48,89
Savane	7722,91	6573,29	-1149,62	-14,88
Culture ou jachère	155,92	203,38	47,46	30,44
Bâti ou sol nu	332,56	1662,91	1330,35	400,03
Zone humide	338,43	619,66	281,23	83,10
Plan d'eau	104,95	99,91	-5,04	-4,80

• Dynamique de l'occupation des sols sur la période 2006-2020

La période 2006-2020 est marquée par une stabilité des zones humides et les plans d'eau (figure 5). Cependant, le tableau VIII montre que les terres cultivées ou en jachères et les zones bâtis ou sols nus présentent de légères progressions, avec la totalité de changements respectifs de 34,32 % et de 22,43 %. L'occupation du sol pendant cette période enregistre une diminution des classes des zones humides (-0,57 %), des savanes (-3,65 %), des plans d'eau (-11,65 %) et en particulier de la classe des lambeaux de forêt (-35,5 %).

Tableau 8. Changement de l'occupation des sols entre 2006-2020

	2006	2020	Gain et perte (km ²)	Gain et perte (km ²) (%)
Lambeau de forêt	528,48	340,85	-187,63	-35,5
Savane	6573,29	6333,31	-239,98	-3,65
Culture ou jachère	203,38	273,19	69,81	34,32
Bâti ou sol nu	1662,91	2035,89	372,98	22,43
Zone humide	619,66	616,14	-3,52	-0,57
Plan d'eau	99,91	88,26	-11,65	-11,66

• Bilan de la dynamique de l'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama

La figure 8 résumant respectivement des superficies, les gains et pertes et les taux d'évolution des superficies des classes sur les périodes 1990-2006 et 2006-2020. On peut observer que sur les deux périodes considérées, la surface des lambeaux de forêt présente une diminution d'environ 48,89 % et 35,5 % respectivement sur les périodes 1990-2006 et 2006-2020. Durant ces deux périodes, la catégorie qui a progressé le plus est celle des bâtis ou sols nus, surtout sur la période 1990-2006 avec un gain de plus de 1 300 Km² par rapport à sa superficie initiale.

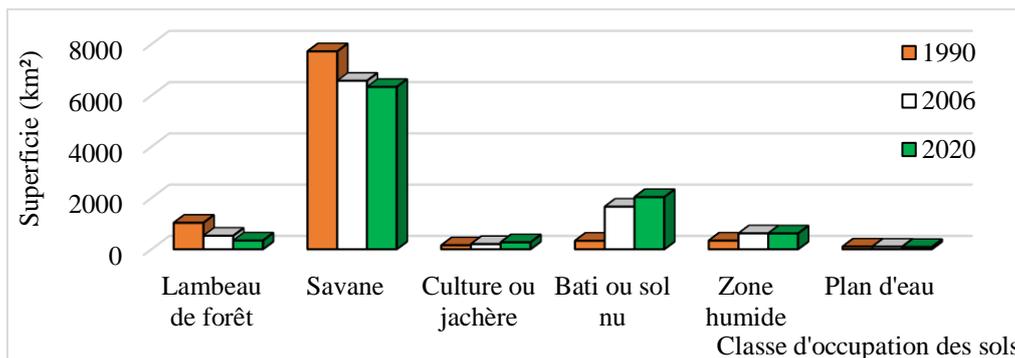


Fig. 8. Dynamique de l'occupation des sols bassin versant du Haut Bandama de 1990 à 2020

4.1.3 OCCUPATION DES SOLS DU BASSIN VERSANT DU HAUT BANDAMA SUR LA PÉRIODE 2020-2050

4.1.3.1 ANALYSE DU CHANGEMENT DE L'OCCUPATION DES SOLS À L'AIDE DU MODÈLE LCM

Les figures 9 et 10 présentent respectivement les changements globaux et nets de l'occupation des sols sur la période 1990-2006. Elles montrent que la plupart des catégories ont des gains et des pertes: les zones de lambeaux de forêt et de savanes ont nettement régressé tandis que les zones de bâtis ou sols nus, les zones de cultures ou jachères et les zones humides ont nettement progressé. La superficie des plans d'eau ne semble pas évoluer. Ces graphiques montrent que le modèle LCM traduit bien la dynamique observée sur la période 1990-2006.

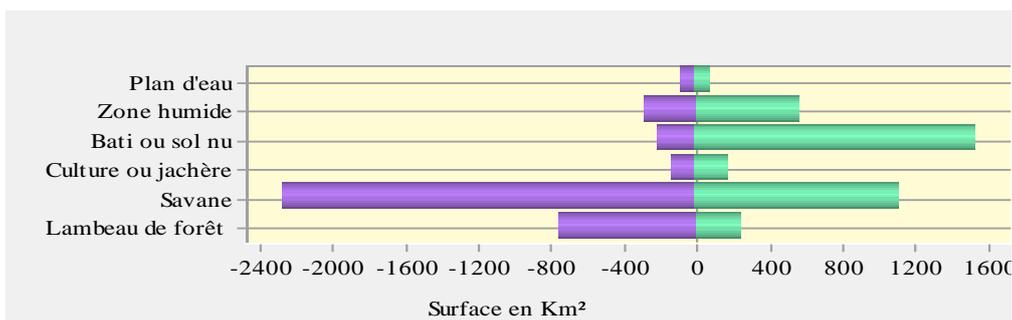


Fig. 9. Gains et pertes en Km² de l'occupation des sols entre 1990 et 2006

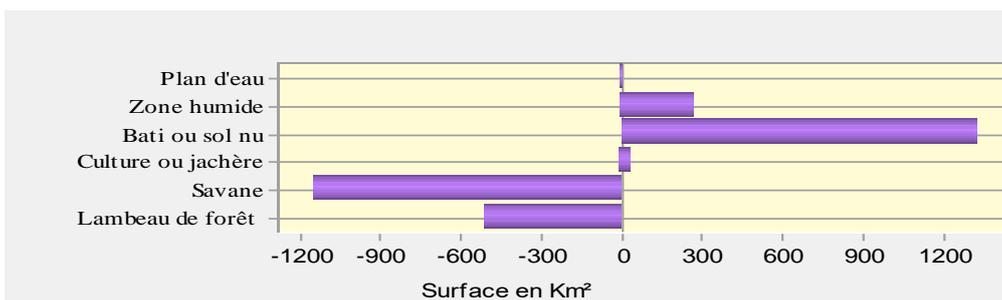


Fig. 10. Changement net de l'occupation des sols entre 1990 et 2006

La classe de savane présente la plus forte contribution dans la plupart des changements nets des catégories d'occupation des sols, suivi des bâtis ou sols nus (Figure 11). Toutefois, il existe des transitions potentielles des lambeaux de forêt vers les savanes. On note des transitions potentielles sur le bassin entre la classe des bâtis et sols nus et la classes de savanes. La classe des bâtis et sols nus augmentent de superficie au détriment de la classe des savanes. Également, les cultures et jachères perdent leur superficie au profit des savanes tandis que les plans d'eau régressent au profit des bâtis et sols nus. Au niveau des

classes des bâtis et sols nus, on assiste à une perte des surfaces au profit des classes de savane. De même les zones humides régressent au profit des classes de savane.

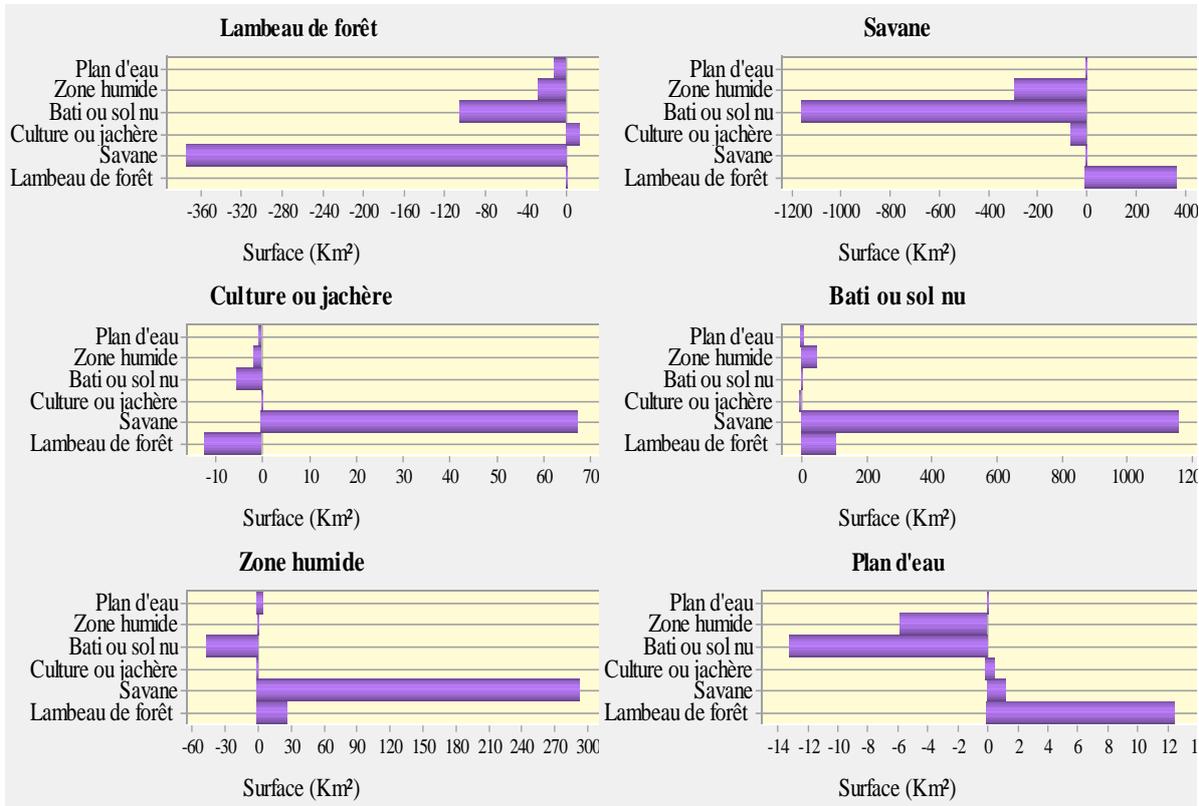


Fig. 11. Contributions du changement net des catégories de l'occupation des sols de 1990 à 2006

Les figures 12, 13 et 14 présentent la cartographie de la tendance des indices de transitions des catégories de l'occupation des sols entre 1990 et 2006. Dans ces figures, la couleur rouge foncé indique les plus fortes transitions des catégories. A l'inverse, la couleur vert foncé montre qu'aucun changement n'a eu lieu. Les transitions des bâtis et sols nus (Figure 12) sont très importantes dans la partie Nord-Ouest et Ouest du bassin versant et tend vers les localités de M'bengué et N'ganon pour arriver dans zone de Sinématiali et Korhogo (avec Les indices 0,014 à 0,044). Cette transition se ressent mais faiblement dans la zone du complexe sucrier de Ferkessedougou. Au niveau de la catégorie des classes de culture ou jachère (Figure 13) les transitions ont lieu à l'extrême Ouest et le Nord-Ouest du bassin versant passant par M'bengué avec moins d'intensité. Cependant au Sud du bassin dans la zone du complexe sucrier de Ferké 1 et 2, la tendance générale de transition des cultures ou jachères montre de forts changements avec des indices compris entre 0,017 et 0,030.

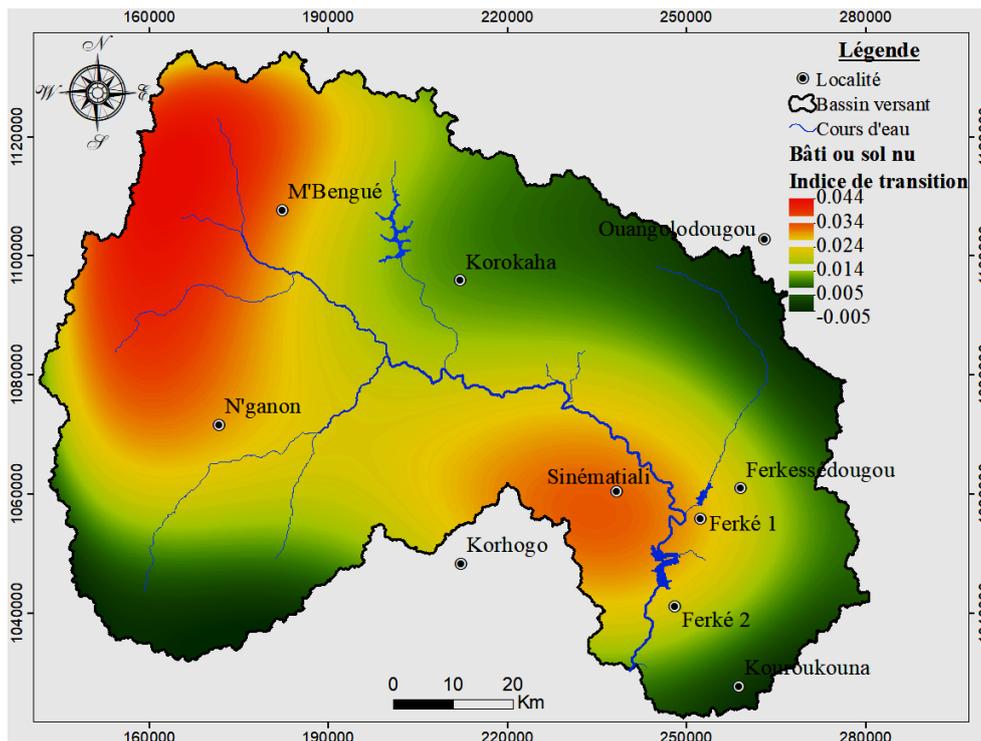


Fig. 12. Tendence du changement global des bâtis ou sols nus sur la période 1990-2006

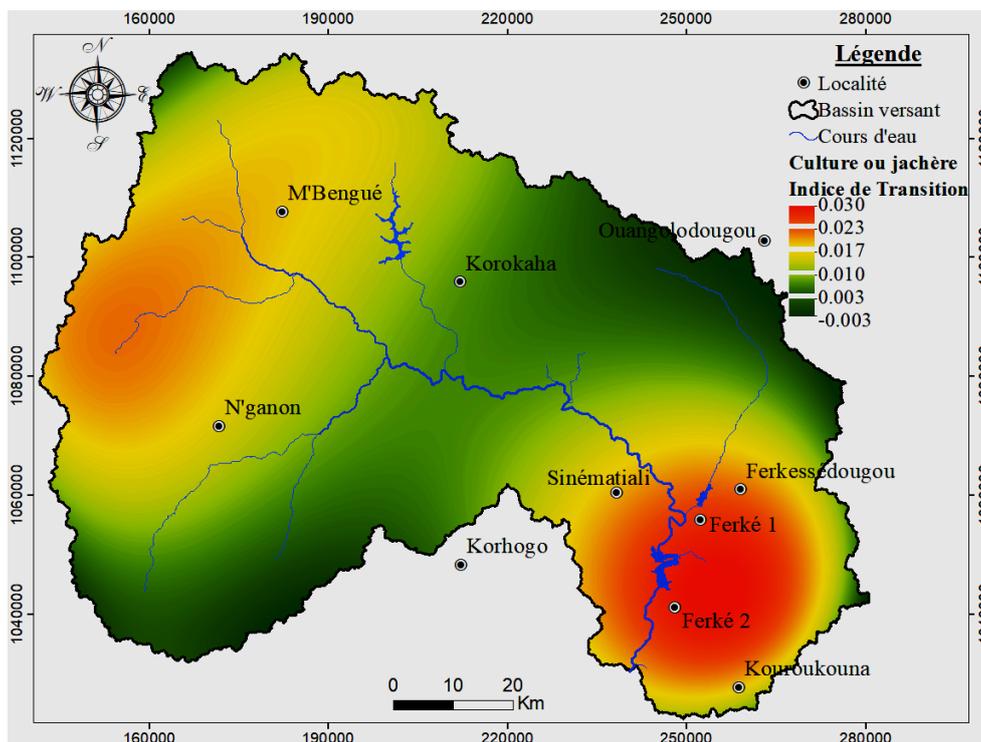


Fig. 13. Tendence du changement global des cultures ou jachères sur la période 1990-2006

Les transitions générales des lambeaux de forêt (Figure 14) ont lieu dans le Nord, dans l'Est et Sud-Est du bassin versant. Les indices de transition y sont dans l'ordre de 0,044 à 0,149. La figure 15 montre la transition globale de la classe des plans d'eau au Nord dans les localités de Korokaha et Ouangolodougou avec des indices (compris entre 0,015 et 0,149) inférieurs à ceux des lambeaux de forêt.

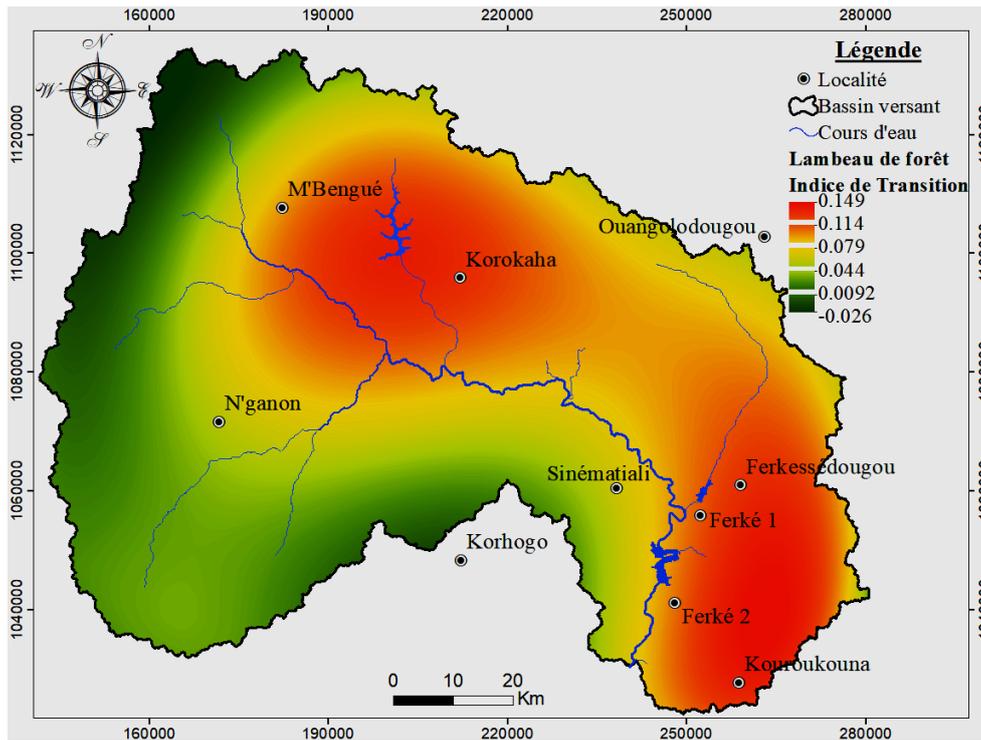


Fig. 14. Tendence du changement global des lambeaux de forêt sur la période 1990-2006

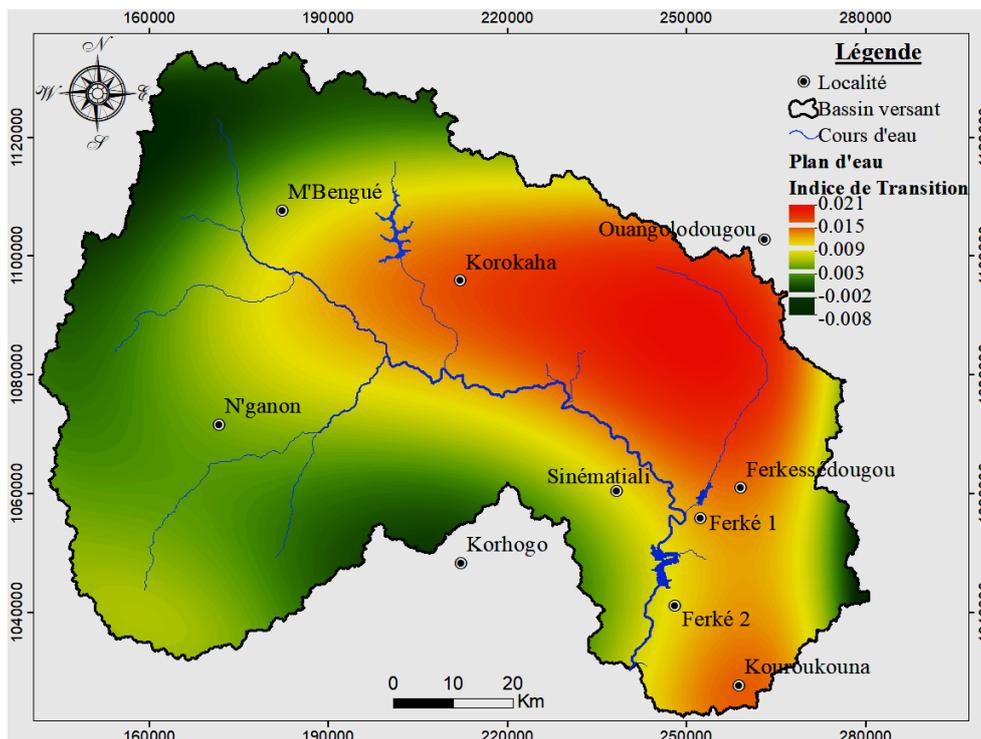


Fig. 15. Tendence du changement global des plans d'eau sur la période 1990-2006

A la figure 16, les indices de transition des savanes montrent que la plus forte transition de la classe des savanes à lieu dans l'Ouest du bassin. Cette transition est observée également au Sud-Est, touchant le complexe sucrier de Ferké 1 et 2 (avec des indices allant de 0,210 à 0,297). La figure 17 montre que les transitions des zones humides sont élevées au Nord-est du bassin versant. Mais également au centre Ouest, au Sud-Ouest et au Sud-Est du bassin versant avec des indices de transition faible allant de 0,010 à 0,059.

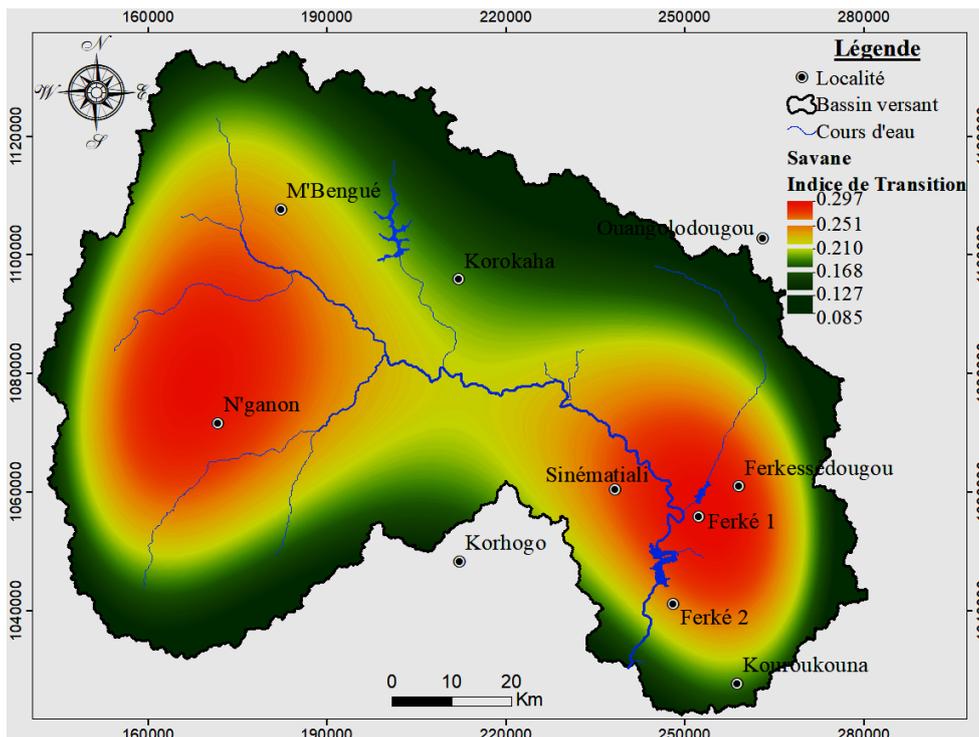


Fig. 16. Tendence du changement global des savanes sur la période 1990-2006

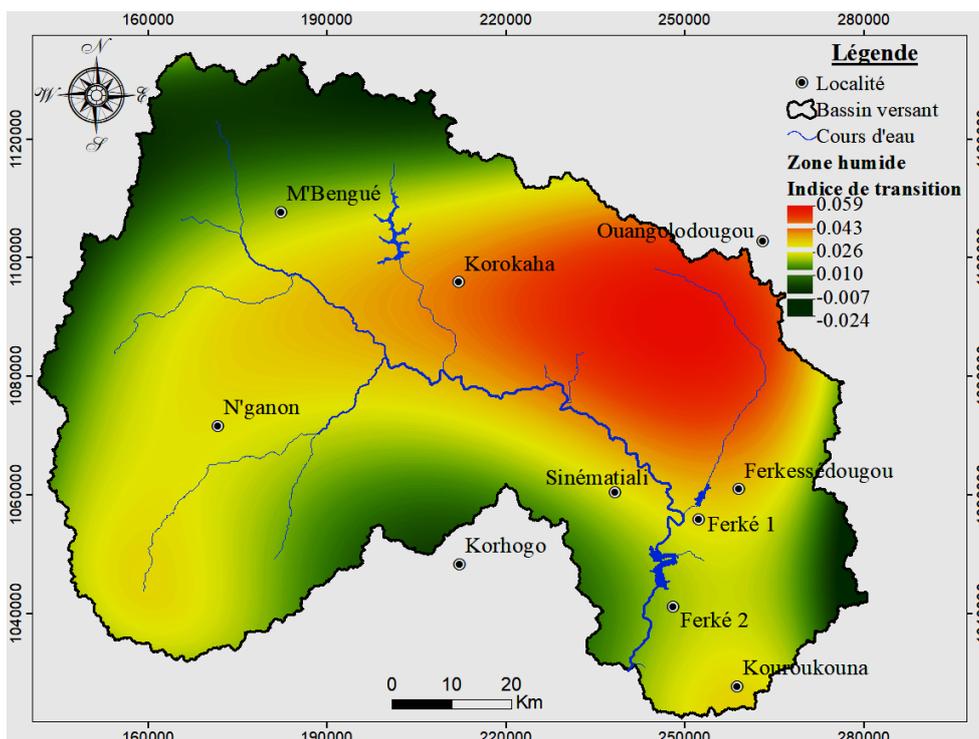


Fig. 17. Tendence du changement global des savanes et zones humides entre 1990 à 2006

4.1.3.2 SIMULATION DE L'OCCUPATION DES SOLS DE 2020 ET VALIDATION DU MODÈLE LCM

Dans cette partie, la chaîne de Markov a été appliquée pour déterminer les potentielles transition en 2020 sous forme d'une matrice de probabilité (tableau X). D'après cette matrice, les changements de l'occupation des sols peuvent arriver à

toutes les catégories à l’horizon 2020. Parmi ces catégories, les possibilités de changement pour les lambeaux de forêt, cultures ou jachères, Bâti ou sols nus, Zones humides et Plans d’eau sont assez élevées (valeurs sur la diagonale principale de la matrice inférieures 0,5). Tandis que les changements pour les savanes, sont relativement faibles (valeurs supérieures 0,6).

Tableau 9. Matrice des probabilités de transition de l’occupation des sols de 2020

		Occupation du sol (2020)					
		Lambeau de forêt	Savane	Culture ou jachère	Bâti ou sol nu	Zone humide	Plan d’eau
Occupation du sol (2006)	Lambeau de forêt	0,3026	0,5576	0,0084	0,0907	0,0235	0,0172
	Savane	0,0275	0,7145	0,0183	0,1666	0,0657	0,0074
	Culture ou jachère	0,1593	0,5144	0,1472	0,1487	0,0236	0,0069
	Bâti ou sol nu	0,0000	0,5050	0,0586	0,4046	0,031	0,0017
	Zone humide	0,0030	0,6271	0,0047	0,1663	0,1773	0,0215
	Plan d’eau	0,0442	0,5322	0,0025	0,1234	0,1275	0,1701

Sur la base de la matrice des probabilités de transition obtenue, la carte prédictive de l’occupation des sols à l’horizon 2020 a été générée (Figure 18). Cette carte contient les mêmes catégories de l’occupation des sols que celles de 1990 et 2006, à savoir, la catégorie des lambeaux de forêt, des savanes, des cultures ou jachères, des bâtis ou sols nus, des zones humides et des plans d’eau.

Les valeurs de la précision montrent que la précision globale et le coefficient Kappa de la carte prédictive de 82% et 0,81 respectent les valeurs recommandées qui sont de 0,80 et 80% respectivement. De plus l’application du test de Wilcoxon au seuil de significativité de 5 % aux superficies simulées et celles observées plus haut (figure 7) montre qu’il n’existe pas de différence significative entre elles avec un P-value de 0,84 et corrélation de 0,99 (figure 19). Ce qui rend le traitement acceptable et le modèle viable pour la prédiction. Tout de même on observe que le modèle LCM surestime les superficies des bâtis et sols nus.

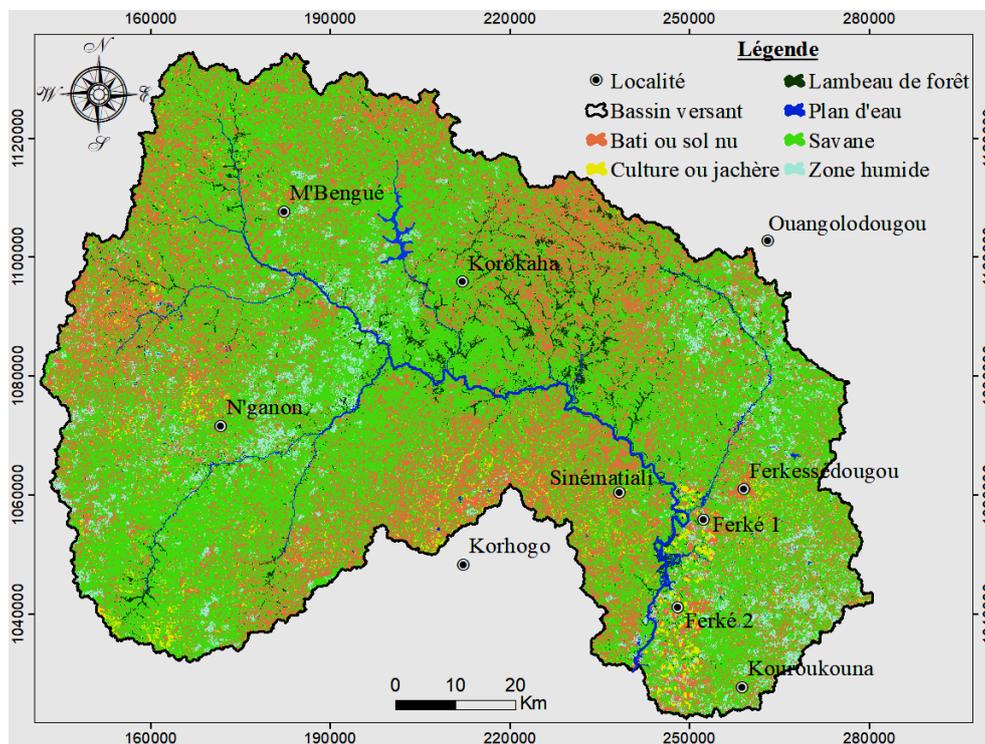


Fig. 18. Carte prédictive de l’occupation des sols de 2020

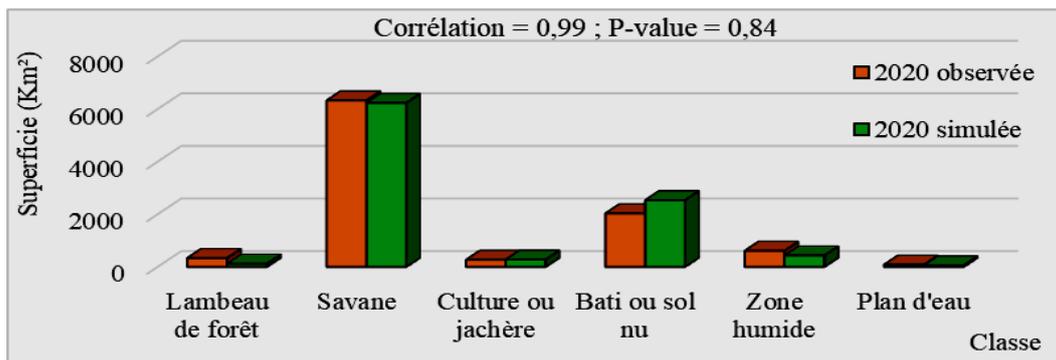


Fig. 19. Comparaison des classes d'occupation des sols simulées et observées de 2020

4.1.3.3 SIMULATION DE L'OCCUPATION DES SOLS AUX HORIZONS 2035 ET 2050

La précision de la carte prédictive a permis de valider la stabilité du modèle LCM. Donc, elle nous permet d'appliquer ce modèle pour la prédiction de l'occupation des sols à l'horizon 2035 et 2050. Les cartes prédictives de l'occupation des sols à l'horizon 2035 et 2050 pour le bassin versant du Haut Bandama sont présentées dans la figure (20 et 21 respectivement). Ces figures montrent que l'expansion des zones bâties ou sols nus est élevée plus à l'est de la localité de Korokaha, à l'extrême Ouest du bassin versant et la zone entre Korhogo et Sinématiali. Cependant, les cultures ou jachères au Sud du bassin versant peuvent être progressivement remplacées par des sols nus ou bâtis (figure 20 et 21).

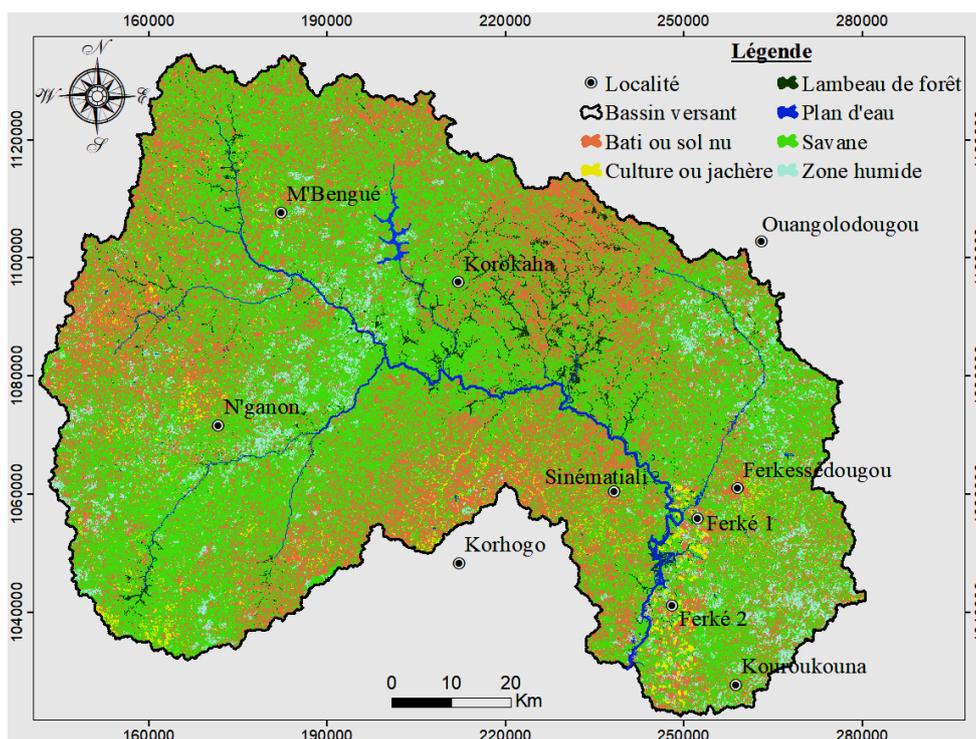


Fig. 20. Cartes de l'occupation des sols bassin versant du Haut Bandama en 2035

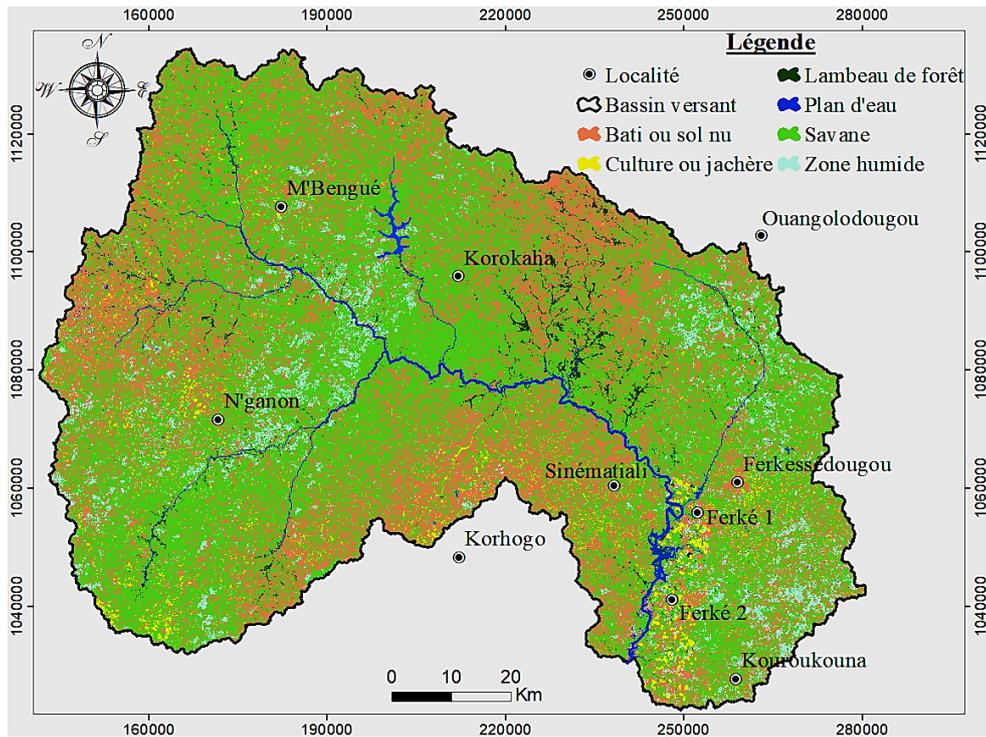


Fig. 21. Cartes de l'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama en 2050

4.1.3.4 ANALYSE DIACHRONIQUE DE L'OCCUPATION DES SOLS DU BASSIN VERSANT DU HAUT BANDAMA

Le tableau XI et la figure 22 présentent l'évolution de l'occupation des sols sur deux périodes (2020 à 2035) et (2035 à 2050). Ils montrent également que sur ces deux périodes, la surface des savanes diminuera très significativement tandis que la surface des bâtis ou sols nus augmentera significativement de 2020 à 2035. Cette tendance persistera sur la période de 2035 à 2050. Les terres agricoles et les zones humides évolueront et tendront à se stabiliser sur la période 2035 à 2050 tandis que la superficie des lambeaux de forêt et les plans d'eau diminueront progressivement sur l'ensemble de la période.

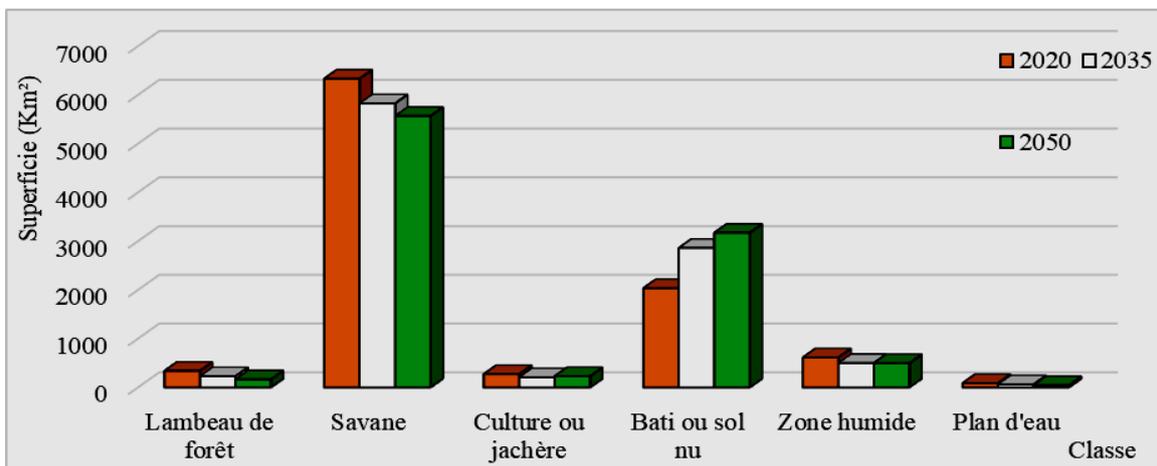


Fig. 22. Evolution de l'occupation des sols de 2020 à 2050

Tableau 10. Analyse du changement de l'occupation des sols de 2020 à 2050

Classe	Surface 2020 (Km ²)	Surface 2035 (Km ²)	Surface 2050 (Km ²)	2020-2035		2020-2050	
				Gain et perte (Km ²)	%	Gain et perte (Km ²)	%
Lambeau de forêt	340,85	229,37	163,85	-111,48	-32,7	-177	-51,9
Savane	6333,31	5826,1	5568,93	-507,21	-8,0	-764,38	-12,1
Culture ou jachère	273,19	207,82	229,79	-65,37	-23,9	-43,40	-15,9
Bâti ou sol nu	2035,89	2860,85	3183,13	824,96	40,5	1137,24	55,9
Zone humide	616,14	500,62	496,96	-115,52	-18,8	-119,18	-19,3
Plan d'eau	88,26	62,89	44,99	-25,78	-29,2	-43,27	-49,0

4.1.4 IMPACT DE LA DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DE L'OCCUPATION DES SOLS SUR LE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

L'analyse de l'état de surface des sols et de la synthèse des études antérieures sur les coefficients de ruissellement des bassins versants expérimentaux a permis d'obtenir les coefficients de ruissellement K_{ri} de chaque classe d'occupation des sols du bassin versant du Haut Bandama (Tableau XII). Les zones de Lambeaux de forêt, de savane et de culture ou jachère présentent le plus faible K_{ri} . Cependant les zones de bâti ou sol nu, de zone humide et de plan d'eau présente des K_{ri} élevés.

Tableau 11. Coefficients de ruissellement selon l'occupation des sols

État de surface	Coefficient de ruissellement K_{ri} (%)
Lambeau de forêt	7
Savane	14
Culture ou jachère	21
Bâti ou sol nu	70
Zone humide	80
Plan d'eau	100

La figure 23 montre l'évolution temporelle du coefficient de ruissellement moyen annuel dans le bassin versant du Haut Bandama.

Sur la période 1990-2006, on assiste à une augmentation du coefficient de ruissellement qui passe de 18,5 % à 28,5 %. De même sur la période 2006-2020 on constate une légère augmentation allant de 28,5% en 2006 à 30,7% en 2020. Cette dernière évolution pourrait se poursuivre jusqu'à l'horizon 2050 avec 34,5% en 2035 et 36,4% en 2050.

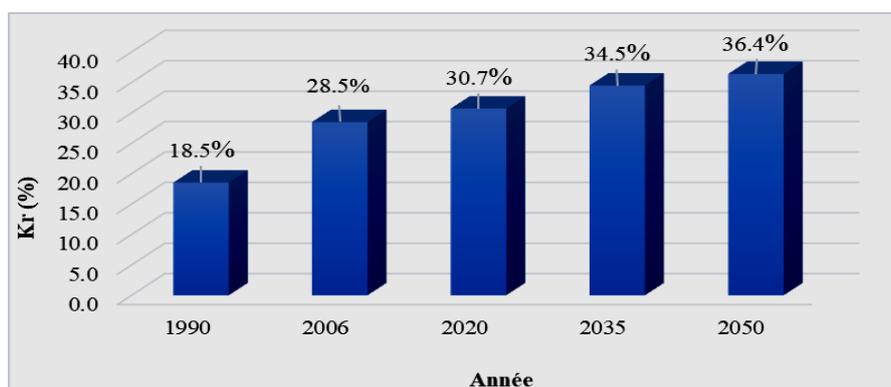


Fig. 23. Évolution temporelle du coefficient de ruissellement moyen annuel sur le bassin versant

4.2 DISCUSSION

Après traitement des images Landsat sous ENVI, six (6) unités d'occupation du sols (Lambeau de forêt, Savane, Culture et jachère, bâti et sol nu, Zone humide et Plan d'eau) dans le bassin versant du Haut Bandama à Badikaha se sont dégagées. La précision globale (comprises entre 95% et 100%) et le coefficient de Kappa (compris entre 0,95 et 0,99) obtenus lors de la classification des images montrent que les traitements effectués sur ces images sont satisfaisants. Les valeurs obtenues à partir des matrices de confusion sont supérieures à celles recommandées qui sont respectivement de 85 % et 0,8 [12]. Cela confirme la similarité des cartes d'occupation des sols simulées et observées. De façon générale on observe un dynamisme au niveau de chaque classe d'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama à Badikaha. Au cours de la période 1990-2006, on observe une importante progression de la superficie des classes de cultures ou jachères (30,44 %), des zones humides (83,10 %) et des bâtis et sols nus (400,03 %). Contrairement à ces classes, les lambeaux de forêt (- 48,89 %), des savanes (-14,88 %) et des plans d'eau (-4,80 %) connaissent une diminution importante. En effet la présence des industries de transformation de canne (SUCAF-CI) et de coton (Coton-Ivoire) dans cette partie de la Côte d'Ivoire, favorise l'implantation des hommes. D'après le Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 1998, la densité de la population passe de 33,5 habitants/km² en 1988 à 47,7 habitants/km² en 1998. C'est le même constat fait par [19] lorsqu'il affirme que les infrastructures incitent la croissance démographique et le développement des activités anthropiques qui intensifient les modifications de l'occupation du sol et des états de surface.

L'implantation des hommes n'est pas sans conséquences sur l'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama. On assiste à une régression de la superficie des classes de forêt, savane et plan d'eau en 2006 au profit des classes de cultures ou jachères, des zones humides et des bâtis et sols nus. La classe des zones humides a doublé de superficie en raison du retrait des plans d'eau et de l'exploitation de la végétation aquatique au profit des maraîchers laissant apparaître des terres humides. Les zones humides qui présentent une distribution éparse sont utiles dans le maintien de la biodiversité et la qualité des ressources en eau [3]. La dynamique de l'occupation du sol observée sur la période 1990-2006 se poursuit sur la période 2006-2020 où la superficie des classes de lambeaux de forêt, de savanes et de plans d'eau régresse respectivement de (-35,5 %), (-3,65 %) et (-11,65 %) tandis que les classes de cultures et jachères ainsi que de bâtis et sols nus sont en augmentation respectivement de 34,32 % et 22,43 %. Seule la classe des zones humides est restée relativement stable avec une variation très faible de -0,50 %. Cependant, cette modification de l'état de surface des sols sur la période 2006-2020 est moins accentuée par rapport à la période précédente (1990-2006). Ce ralentissement de la dynamique d'occupation des sols dans le bassin versant du Haut Bandama sur la période 2006-2020 est dû à l'abandon des activités de la population fuyant les zones sous contrôle des forces armées nouvelles (zone de combats fréquents) jusqu'en 2012 du Nord vers le sud du pays. C'est ce que montre les études de [20] dans le Parc national du Mont Péko, où les taux de déforestation au cours des périodes post-conflits dans les zones sous contrôle des forces nouvelles sont largement supérieurs à celui de la période des conflits. Malgré le déplacement massif des populations, on note tout de même une régression des superficies de lambeaux de forêt, de savanes et de plans d'eau au profit des cultures et jachère ainsi que les bâtis et sols nus dus probablement aux effets du changements climatiques.

A l'horizon 2035 et 2050, les cartes prédictives montrent que l'expansion des zones bâties ou sols nus auront une évolution (de 40,52% et 55,86% respectivement) sur l'ensemble du bassin. Cela sera plus accentué à l'est de la localité de Korokaha, à l'extrême Ouest du bassin versant et la zone entre Korhogo et Sinématiali. A l'inverse des classes de bâtis et sols nus, toutes les autres classes d'occupation des sols perdront en superficie au profit des bâtis et sol nu. Cette régression des classes d'occupation des sols affecte plus les classes de lambeaux de forêts de -32,71 % et -51,93 % aux horizons 2035 et 2050 respectivement. Elles sont suivies des classes de plan d'eau avec un taux -29,21% en 2035 et -49,03% en 2050.

La dynamique de l'état de surface des sols n'est pas sans conséquence sur le ruissellement. La période 1990 à 2006 a connu une augmentation du coefficient de ruissellement qui passe de 18,5% à 28,5% respectivement et de 28,5% en 2006 à 30,7% en 2020 pour la période 2006-2020. Cette dernière évolution se poursuivra jusqu'à l'horizon 2050. L'augmentation du coefficient de ruissellement est due à l'urbanisation et aux cultures extensives. En effet, l'extension du tissu urbain et des cultures provoquent une augmentation des coefficients de ruissellement des bassins versants [21]. L'urbanisation et l'agriculture se présentent donc comme le facteur anthropique à la base de l'augmentation du coefficient de ruissellement moyen sur les bassins versants [22].

5 CONCLUSION

L'utilisation de l'algorithme maximum de vraisemblance pour la classification a permis d'obtenir des coefficients de Kappa compris entre 0,95 et 1 pour la dynamique d'occupation du sol. Également les précisions globales obtenues sont assez élevées et comprises entre 95 % et 100 %). On enregistre une importante progression de la superficie des classes de cultures ou jachères

(30,44 %), des zones humides (83,10 %) et des bâtis et sols nus (400,03 %) de 1990 à 2006. Contrairement à ces classes, les lambeaux de forêt (-48,89 %), des savanes (-14,88 %) et des plans d'eau (-4,80 %) connaissent une diminution importante. Cette dynamique est conservée sur la période 2006-2020, mais avec moins d'intensité.

Les changements de l'occupation des sols observés entre 1990 et 2006 intégrés dans le sous-modèle de transition (LCM) ont montré que la plupart des catégories d'occupation du sol perdront en superficie au profit des bâtis et sol nu à l'horizon 2050. La dégradation du couvert végétal a entraîné l'augmentation du coefficient de ruissellement de 18,5% en 1990 à 30,7% en 2020. Cette évolution se poursuit jusqu'à l'horizon 2050. Ces phénomènes annoncent une désertification du bassin versant du Haut Bandama aux horizons 2035 et 2050 si des politiques de reboisements et de lutte contre l'intensification des facteurs anthropiques sur la modification de l'occupation des sols ne sont pas entreprises.

REFERENCES

- [1] Malan, D. F., Aké, A. L., Tra Bi, F. H., & Danho N., Diversité floristique du parc national des îles Ehotilé (Littoral est de la Côte d'Ivoire). *Bois et forêts des tropiques*, N° 292 (2), 2007.
- [2] Scouart M. & Lambin E. F., Approche systémique des causes de la déforestation en Amazonie brésilienne: syndromes, synergies et rétroactions. *L'Espace Géographique*, 3: 241-254, 2006.
- [3] Nghiem, V-T., Nedjai, R., L., V-A, and Charleux, L., Application of GIS and remote sensing for predicting land-use change in the French Jura Mountains with the LCM model: the impact of variables on the disturbance model', *Proceeding of the 34th Asian Conference on Remote Sensing*, Bali, Indonesia, pp. 2588-2595, ISBN: 978-602-9439-33-5, (SC04-95 à SC04-102), 2013.
- [4] Baron C., L'eau en Afrique: disponibilité et accès, *Les Nouveaux Défis de l'énergie Paris*, Economica. *Revue futuribles* n° 359, pp. 33-56, 2009.
- [5] Péné B. C., Pluviométrie et gestion de l'irrigation comme déterminants des rendements canniens en Côte d'Ivoire. In *Communications présentées au Congrès Artas-Afcas*, 12-18 octobre 1997, St. Denis de la Réunion, la Réunion. Artas-Afcas, pp. 394-413, 1997.
- [6] Kouadio, Z. A., *Dynamique de l'Occupation du Sol et du Comportement Hydrologique: Cas des Bassins Versants Côtiers de l'Agnéby et du Boubo (Côte d'Ivoire)*, (Doctorat unique) Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan, Côte d'Ivoire, 198, 2011.
- [7] Jofack S. V. C., Kouamé F. K., Dibi N'da H., Tankoano B., Akpa Y. L., Ngounou N. B., Cartographie de l'occupation de sol des Hauts Plateaux de l'Ouest Cameroun par réseaux de neurones appliqués à une image LANDSAT 8 OLI. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 23 (2), pp. 443-454, 2016.
- [8] Lebœuf A., Paquet A., *Guide d'interprétation des mosaïques d'images satellitaires Landsat*. Secteur des Forêts, Ministère des Ressources naturelles, Québec, 22, 2013.
- [9] Oszwald, J., *Dynamique des formations agroforestières en Côte d'Ivoire (des années 1980 aux années 2000): Suivi par télédétection et développement d'une approche cartographique*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 304, 2005.
- [10] Soro T. D., Kouakou B. D., Kouassi E. A., Soro G., Kouassi A. M., Kouadio K. E., Yéi M.-S. O. & Soro N., 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) pp. 1-22, 2013.
- [11] Eastman J. R., *TerrSet geospatial monitoring and modeling system*, Tutorial Version 2020v.19.0. Clark University, Worcester, 2020.
- [12] Mather P. M., *Computer Processing of Remotely Sensed Images: An introduction*. 3rd ed. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, West Sussex, England, 2004.
- [13] Oñate-Valdivieso F., Sendra J. B., Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land-use scenarios for hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. Elsevier, Vol 395, pp. 256-263, 2010.
- [14] Huang S., The potential of multi-sensor satellite data applications in environmental monitoring with special emphasis on land cover mapping, desertification monitoring and fire detection. Thèse de l'Université München. 155, 2004.
- [15] Nghiem V-T., Impact du changement du mode d'occupation des sols sur le fonctionnement hydrogéochimique des grands bassins versants: cas du bassin versant de l'Ain. Doctorat de Université de Grenoble, Spécialité: Science de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement, Laboratoire UMR PACTE, France, 306, 2014.
- [16] Brou K., *Jaugeages sur grandes rivières à Borotou, Simulation de la pluie, rapport de stage*, laboratoire d'hydrologie, ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire), 44, 1985.
- [17] Yacouba, H., Da, D. E. C., Yonkeu, S., Zombre, P. & Soule, M., Caractérisations du ruissellement et de l'érosion hydrique dans le bassin supérieur du Nakambe (Burkina Faso). In *5ème conférence Inter-régionale sur l'environnement et l'eau*, Ouagadougou, pp. 318-325, 2002.

- [18] Bouvier C., Berthelot M., Janeau J. L., Campagne de simulation de pluie en milieu urbain, Yopougon. ORSTOM-CIEH, 16, 1987.
- [19] Mahé G., Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20^{ème} siècle: changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. Mémoire d'HDR, Université de Montpellier II, 160, 2006.
- [20] Ousmane S., N'da Dibi H., Kouassi K. H., Kouassi K. E., Ouattara K., Crises politico-militaires et dynamique de la végétation du Parc national du Mont Péko en Côte d'Ivoire. Bois et Forêts des Tropiques, 343: pp. 27-37, 2020.
- [21] Ferhi N. et Yadh Z., Étude de l'impact de l'extension et de la densification du tissu urbain sur les coefficients de ruissellement dans le bassin versant des oueds el-ghrich et el-Greb (Tunis) par l'application de la méthode SCS aux évènements de septembre 2003, physio-géo, volume 10, url: <http://physio-geo.revues.org/4769>; doi: 10.4000/physio-geo, 4769, 2016.
- [22] Sawadogo K. Z., Simulation et optimisation du fonctionnement d'un petit barrage et de son périmètre rizicole irrigué: cas de nanan à Yamoussoukro. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 243, 2020.



Characterization of the variability in climate extremes in the Ferkessédougou sugar complexes (Northern Côte d'Ivoire)

Affoué Berthe Yao¹, Sampah Georges Eblin¹, Loukou Alexis Brou¹, Kouakou Lazare Kouassi¹,
Gla Blaise Ouede¹, Ibrahim Salifou¹, Arona Diedhiou², and Bi Crépin Péné³

¹Department of Earth Sciences, Jean Lorougnon Guédé University, Daloa, BP 150, Côte d'Ivoire

²IRD, CNRS, Grenoble INP, IGE, University Grenoble Alpes, Grenoble 3800, France

³Research and Development Department, SUCAF-CI, Abidjan, 01 BP 1967, Côte d'Ivoire

Correspondence: Affoué Berthe Yao (y_berth@yahoo.fr)

Published: 16 November 2021

Abstract. This study aims to analyse the frequency, intensity and duration of extreme climate events in order to optimise sugarcane production in the Ferkessédougou sugar complexes. The methodological approach is based on the calculation of extreme climate indices defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) from daily rainfall and temperature data observed at the Ferké 2 station over the period 1999–2018. The results show that the rainfall indices are negative, except for the number of consecutive dry days (CDD); this shows a decreasing trend in rainfall with, however, insignificant trends. Over the period 1999–2006, the number of intense rainfall days (R10 mm) decreased from 40 to 28 d with an average decrease of 0.3 d yr^{-1} and the number of very intense rainfall days (R20 mm) fluctuated between 26 and 2 d, with a slope of 0.083. The extreme temperature indices show statistically significant positive trends for the warm sequences; this confirms the rising of temperatures on both a local and national scale. This study could enable the Ferkessédougou sugar complexes managers to develop strategies for adaptation to climate change.

1 Introduction

The consequences of climate change are clearly visible with the advent of extreme events such as floods, droughts, melting glaciers, scarcity of water resources, increase in infectious diseases, etc. (Handmer et al., 2012). Of these extreme events, drought is one of the extreme weather conditions that affects more people than any other form of natural disaster (Wilhite, 2000). The occurrence of drought in recent decades in West Africa highlights the importance of this phenomenon (Bhaga et al., 2020; Faye et al., 2017). Moreover, climate projections have shown that West Africa will experience a significant increase in temperature, with high variability in rainfall (Kouakou et al., 2014; Kouamé et al., 2014; Ly et al., 2013; Yapo et al., 2020). In Côte d'Ivoire, rainfall is the fundamental climatic element that conditions the development of various agricultural activities. Thus, their absence, scarcity, excess/deficit or poor spatial and temporal distribu-

tion generates crises (Péné and Assa, 2003). This is the case of the sugar complexes located in the departments of Ferkessédougou and Tafiré, in the north of Côte d'Ivoire. These sugar complexes exploit the water of the Bandama river for sugar cane irrigation, sugar cane production and domestic needs. Following the example of the large agri-food industry in Côte d'Ivoire, water needs for irrigation and for the populations of this region are progressively increasing and water resources are more and more in demand. However, studies of climate variability in the area have shown that the decline in rainfall that began in the 1970s is continuing (Soro et al., 2013). Annual and inter-annual irregularities in rainfall result in rainy seasons with poor harvests (Péné et al., 2010). Projections show that extreme weather events are expected to become more frequent as the climate warms (Yapo et al., 2020). These events have a negative impact on agriculture, livestock and natural resources, which are sectors on which the bulk of the Ivorian economy is based. It is therefore es-

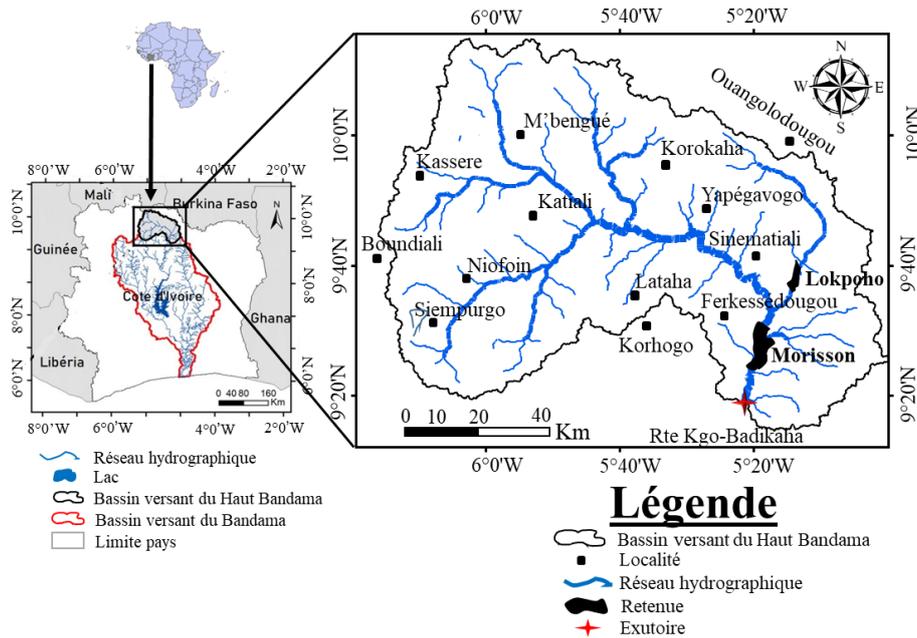


Figure 1. Location of the Upper Bandama watershed.

essential to analyse the variability of rainfall and temperature extremes observed in this region, which is an area of interest for Côte d'Ivoire because of its sugar production capacity. The aim of this study is to analyse the frequency, intensity and duration of extreme climate events with a view to optimising sugarcane production in the Ferkessédougou sugar complexes. The methodological approach is based on the calculation of climate indices defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI).

2 Presentation of the study area

The study area is located in the Upper Bandama watershed, at the Korhogo-Badikaha road station, between longitudes $5^{\circ}00'$ and $6^{\circ}20'$ W and latitudes $9^{\circ}00'$ and $10^{\circ}20'$ N (Fig. 1). It covers the square degrees of the Poro, Tchologo and part of the Bagoue regions with an estimated area of 9850 km^2 and represents about 10 % of the entire Bandama watershed. The two sugar complexes of Ferkessédougou (Ferké 1 & Ferké 2) cover an area of $42\,721 \text{ ha}$. Sugar cane is grown under both irrigated and rain-fed conditions.

The study area is under the influence of the tropical transitional regime characterised by two main seasons (Soro et al., 2013) (Fig. 2).

- a long rainy season, from April to October, with average monthly rainfall ranging from 129.3 to 250.4 mm and
- a long dry season, from November to March, with average rainfall ranging from 1.9 to 82.5 mm.

Average monthly temperature ranges from 25°C in August to 29°C in March.

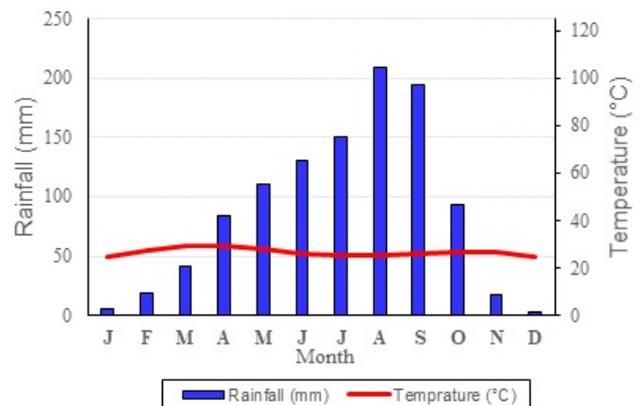


Figure 2. Umbrothermal diagram of Ferké 2 station for the period 1999–2019.

3 Material and methods

3.1 Material

The material consists of climatic data such as daily rainfall and temperature data for the period 1999–2018. These data come from the Ferkessédougou sugar complexes and were recorded at the Ferké 2 station. The synoptic overview of the variability of climate extremes in the study area is carried out with the RCLimDex software. The software provides a data quality check to identify recording errors that may exist in the daily data (WMO, 2009). The quality control process is based on the following principles:

Table 1. List of ETCCDMI core Climate Indices used (Zhang and Yang, 2004).

Identification	Indicator name	Definitions	units
Precipitations			
PRCPTOT	Annual total wet-day precipitation	Annual total PRCP in wet days ($RR \geq 1$ mm)	mm
RX1day	Max 1 d precipitation amount	Monthly maximum 1 d precipitation	mm
RX5day	Max 5 d precipitation amount	Monthly maximum consecutive 5 d precipitation	mm
R95p	Very wet days	Annual total PRCP when $RR > 95$ th percentile	mm
CDD	Consecutive dry days	Maximum number of consecutive days with $RR < 1$ mm	Days
CWD	Consecutive wet days	Maximum number of consecutive days with $RR \geq 1$ mm	Days
R10	Number of heavy precipitation days	Annual count of days when $PRCP \geq 10$ mm	Days
R20	Number of very heavy precipitation days	Annual count of days when $PRCP \geq 20$ mm	Days
Temperatures			
TXx	Max T_{max}	Monthly maximum value of daily maximum temperatures	°C
TNx	Max T_{min}	Monthly maximum value of daily minimum temperatures	°C
TXn	Min T_{max}	Monthly minimum value of daily maximum temperatures	°C
TNn	Min T_{min}	Monthly minimum value of daily minimum temperatures	°C
WSDI	Warm spell duration indicator	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TX > 90 th percentile	Days
CSDI	Cold spell duration indicator	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TN < 10 th percentile	Days
DTR	Diurnal temperature range	Monthly mean difference between TX and TN	°C

- erroneous values of the maximum daily temperature must be replaced by -99.9 if it is lower than the minimum daily temperature;
- it must not have more than 365–366 daily observations per year;
- February should have no more than 28 observations in any given year;
- missing or negative data (for rainfall) are replaced by -99.9 .

3.2 Methods

The analysis of rainfall and temperature extremes was possible through the calculation of climate indices. Although there are many climate indices, 27 have been defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). This method of analysis is commonly used to study extreme events (Aguilar et al., 2009; Filahi et al., 2015; Hountondji et al., 2011; New et al., 2006; Santos et al., 2010).

Detailed descriptions of these indices and the RCLimDex are available on the ETCCDI website (<https://github.com/ECCC-CDAS/RCLimDex>, last access: 19 April 2021). In this study, 8 rainfall indices and 7 temperature indices were used (Table 1). The choice of these indices was made to highlight extreme rainfall events and their frequency on the one hand and to assess temperature variations and their duration on the other hand. The parameters selected are those that can have a positive or negative impact on sugarcane yield. Indeed, Saithanu et al. (2017) studied the effect of minimum

temperature on the different phenological phases of sugarcane. According to Mali et al. (2014), high humidity leads to better sugarcane growth and increased sugar content. Linear trend analysis (expressed as % per year) was carried out from 1999 to 2018 by linear regression between the different rainfall indices and time (in years). The slopes thus estimated were grouped into two classes indicating significant and non-significant trends. The boundary of the two classes considered is defined from the Student's t -statistic used to test the hypothesis of a slope equal to 0. The trend is therefore qualified as significant if the probability p (p value) of the t -test applied to the regression slope is less than 0.05, whereas it is not significant when it exceeds the 0.05 threshold.

4 Results and Discussion

4.1 Results

4.1.1 Variability of extreme rainfall in Ferkessédougou

Figures 3 and 4 show the trends in the variability of the different extreme rainfall indices at the Ferké 2 station over the period 1999–2018. The linear trend line analysis (Fig. 3a) shows a regression of the annual rainfall amounts. The index trend is decreasing by 2.76 mm yr^{-1} . This regression is statistically insignificant with a p value of 0.699. The smoothing curve shows three phases in the evolution of the total annual rainfall. The period 1999–2006 is marked by a drop in annual totals. The period 2006–2014 is characterised by a slight increase in cumulative rainfall. This phase is followed by a further decline from 2015. Similarly, the R95p index

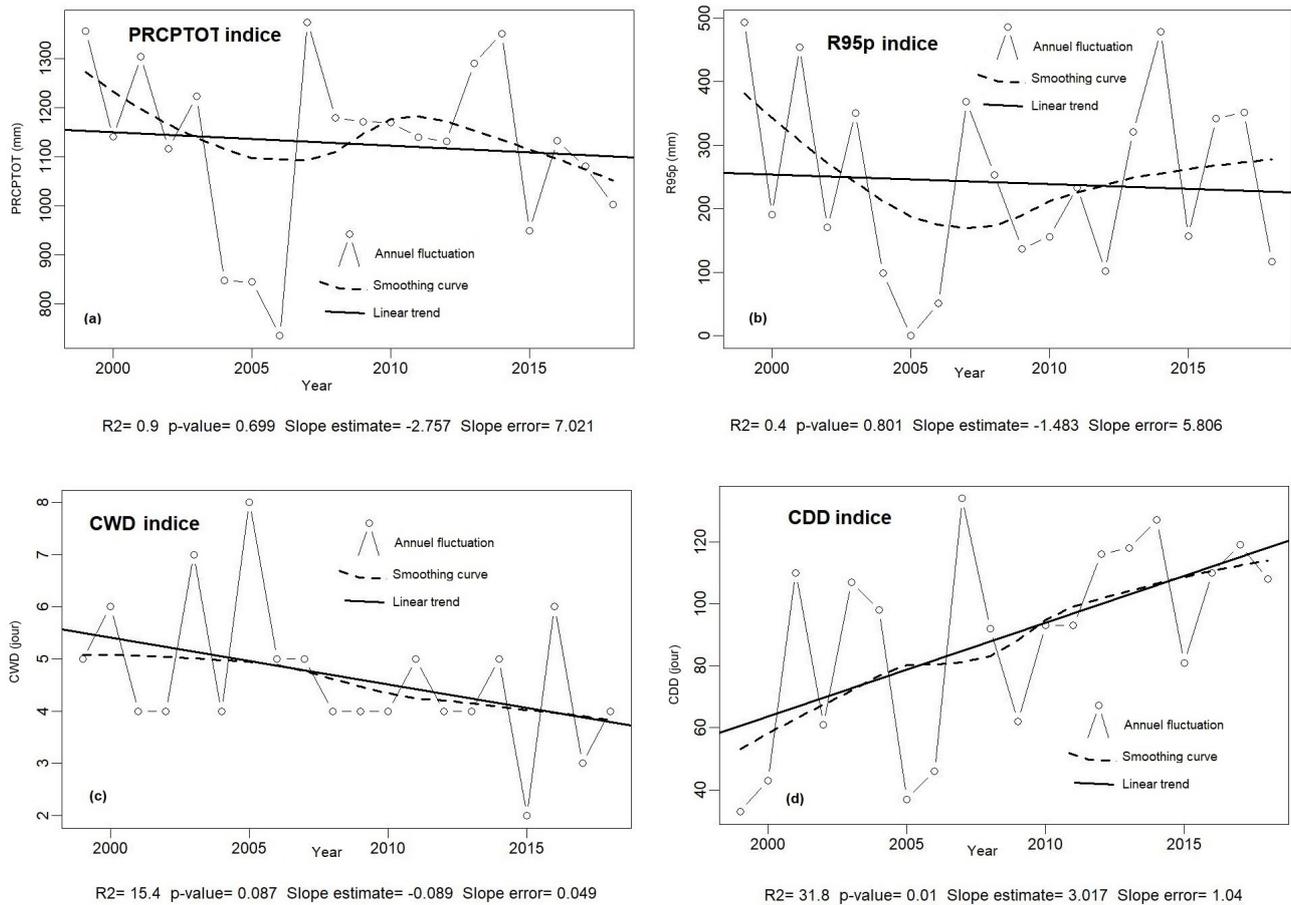


Figure 3. Trends in extreme rainfall indices calculated over the period 1999–2018 at the Ferké 2 station: (a) PRCPTOT indice, (b) R95p indice, (c) CWD indice and (d) CDD indice.

(Fig. 3b), which defines the cumulative rainfall above the 95th percentile of the rainfall time series, is marked by alternating downward and upward trends, with one downward trend that is not very significant (with a p value of 0.801).

Figure 3c and d show the evolution of consecutive wet days (CWD) and consecutive dry days (CDD) at the Ferké 2 station. It can be seen that the CDD (Fig. 3d) is increasing while that of CWD (Fig. 3c) is decreasing. In Ferkessédougou, the maximum number of CWD is 5 to 6 d while CDD reach 120 d (Fig. 3c). The decrease in CWD and CDD remains significant in the Ferkessédougou sugar complexes with p values of 0.087 and 0.01 respectively. In sum, these results confirm the decrease in average annual precipitation in the Ferkessédougou sugar complexes.

Indices Rx1day and Rx5day represent the monthly maximum 1 d precipitation and the monthly maximum consecutive 5 d precipitation respectively during the year (Fig. 4a and b). There was a slight upward trend in both indices. However, this increase is non-significant with p values of 0.475 and 0.175 respectively.

The evolution of intense (Fig. 4c) and very intense (Fig. 4d) rainfall days is similar to that of annual total wet-day precipitation (PRCPTOT). Over the period 1999–2006, the number of intense rainfall days (R10 mm) decreased from 40 to 28 d with an average decrease of 0.3 d yr^{-1} and the number of very intense rainfall days (R20 mm) fluctuated between 26 and 2 d, with a slope of 0.083. From 2006 to 2018, the overall trend for both indices is downward, with little significance. In sum, these analyses show that the decrease in precipitation appears to be due to a decrease in consecutive wet days and an increase in consecutive dry days.

4.1.2 Variability of extreme temperatures in Ferkessédougou

The analysis of Fig. 5 shows a generalized trend of increasing maximum (Fig. 5a) and minimum (Fig. 5b) temperatures, with a highly significant trend (p value equal to 0). The Min T_{max} (Fig. 5c) in Ferké 2 station remains almost stationary while the Min T_{min} indicates a regression (Fig. 5d).

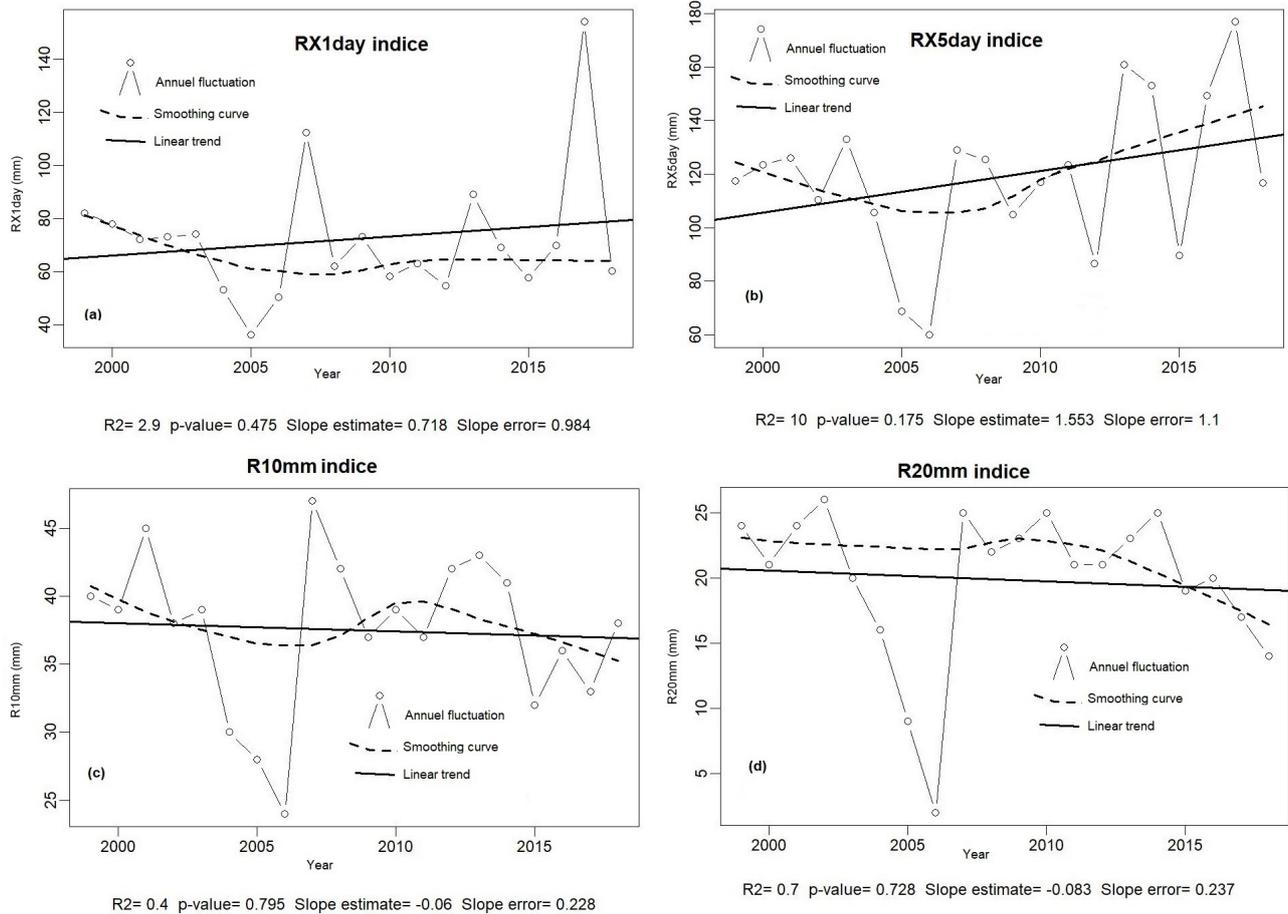


Figure 4. Trends in extreme rainfall indices calculated over the period 1999–2018 at the Ferké 2 station: (a) RX1day indice, (b) RX5day indice, (c) R10 mm indice and (d) R20 mm indice.

The trend in the indices of the cold and warm sequences evolves inversely at Ferké 2 station as shown in Fig. 6. According to this figure, the number of hot days (Fig. 6a) in the year increased by $1.15\% \text{ yr}^{-1}$. Conversely, the number of cold days (Fig. 6b) in the year decreased by $0.13\% \text{ yr}^{-1}$ in Ferkessédougou. The evolution of the diurnal temperature range (DTR) (Fig. 6c), which is also increasing, confirms the global warming. Indeed, the p value of the duration indices of the warm sequences and the thermal amplitudes are lower than 0.05, which indicates that the climatic warming observed in the complexes is very significant.

4.2 Discussion

The application of extreme climate indices in the Ferkessédougou sugar complexes revealed a decrease in cumulative annual rainfall, the number of consecutive wet days and the number of heavy precipitation days at the Ferké 2 station over the period 1999–2018. The analysis reveals a significant trend in the number of consecutive wet days only. These results are similar to those obtained by N'Guessan et al. (2020)

in the Lobo watershed. According to this study, all precipitation indices have decreased over the period 1984–2013. Indeed, the drought trend observed in the north of Côte d'Ivoire is confirmed by the index of consecutive dry days, which is on the rise in the Ferkessédougou area with a very significant regression trend. Thus, these results on the decreasing trend in the number of heavy precipitation days (R10 mm) and very heavy precipitation days (R20 mm) confirm this. Kouassi et al. (2010) reported that the decrease in the frequency of rainy days is synchronous with the decrease in annual rainfall. This decrease in the number of heavy (R10 mm) and very heavy (R20 mm) precipitation days observed in this study would be due to the decrease in the frequency of daily rainfall of between 10 and 50 mm. These different trends indicate that the drought that began in the 1960s and 1970s (Soro et al., 2013) is continuing in the Ferkessédougou sugar complexes, which could have considerable impacts on agricultural production. Indeed, according to studies by Atchérémi et al. (2018), the occurrence of a sequence of consecutive dry days within the rainy season can have a strong impact on agricultural production. The dry sequences create a lack of water in the plant.

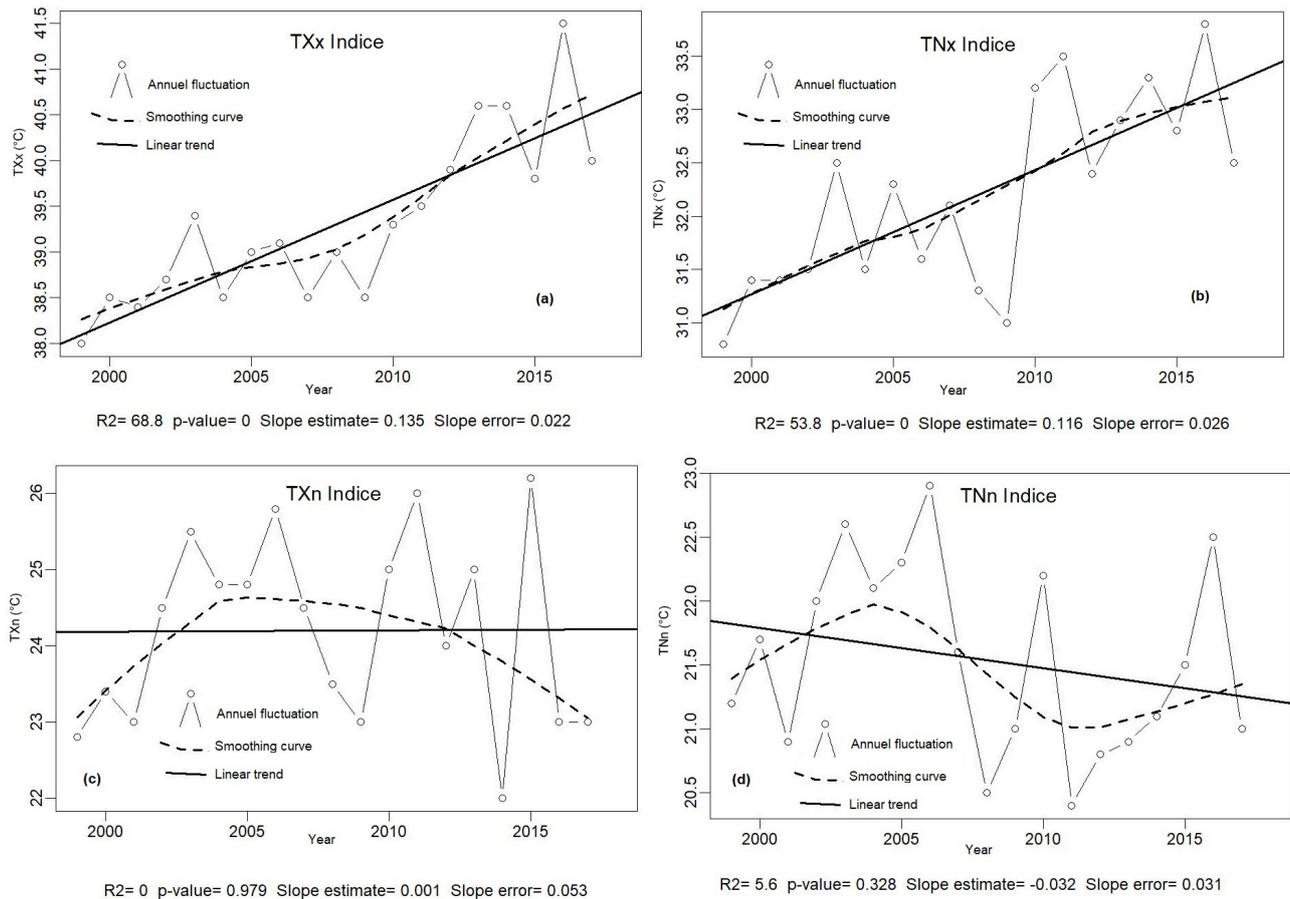


Figure 5. Trend in extreme temperature indices from 1999–2018 at the Ferké 2 station: (a) Max T_{\max} indice, (b) Max T_{\min} indice, (c) Min T_{\max} indice, and (d) Min T_{\min} indice.

When they occur at the beginning or in the middle of the growing season, they can cause a false start to the season or even mortgage an entire crop year. These trends highlighted in our work are in line with those of Djossou et al. (2020), on the Pendjari watershed at the Porga outlet in Benin.

The trend in maximum and minimum temperatures in Ferké 2 station is generally upwards. This increase seems to be accompanied by a significant decrease in the duration of cold sequences while that of warm sequences is increasing. These results are similar to those of Filahi et al. (2015), Karimou-Barke et al. (2015) and Djossou et al. (2020) in their studies on the evolution of peak temperatures in West Africa. These various studies indicate a more or less significant positive trend in the various indices of temperature extremes at local or regional level. These authors have shown a generalized trend of increasing hot days (TX90p index) and a significant increase in the duration of dry sequences (WSDI, TXx and TNn). The increase in temperature extremes can be attributed to heavy anthropisation and more particularly to the development of land use leading to the destruction of vegetation cover, which has increased over the last twenty years throughout the world (Abdalah, 2005). Thus, future projec-

tions also predict an upward trend in these extreme temperature indices (Diedhiou et al., 2018; Yapo et al., 2019) namely heat wave episodes, heat waves, extremely hot and more frequent nights. These extreme events are thought to be related to wind anomalies opposing the mean circulation in the upper and lower troposphere of West Africa (Fontaine et al., 2013).

5 Conclusion

This study examined the evolution of rainfall and extreme temperature indices in the Ferkessédougou sugar complexes over the period 1999–2018. Trend analysis of these indices showed that temperatures have increased significantly, but trends in indices of precipitation extremes are globally insignificant. The temperature extremes show statistically significant positive trends for the warm sequences and the maximum of the max and min temperatures. This confirms the warming of temperatures both locally and nationally.

The precipitation indices are negative, with the exception of the number of consecutive dry days; this shows a decreasing trend in rainfall with, however, insignificant trends. The

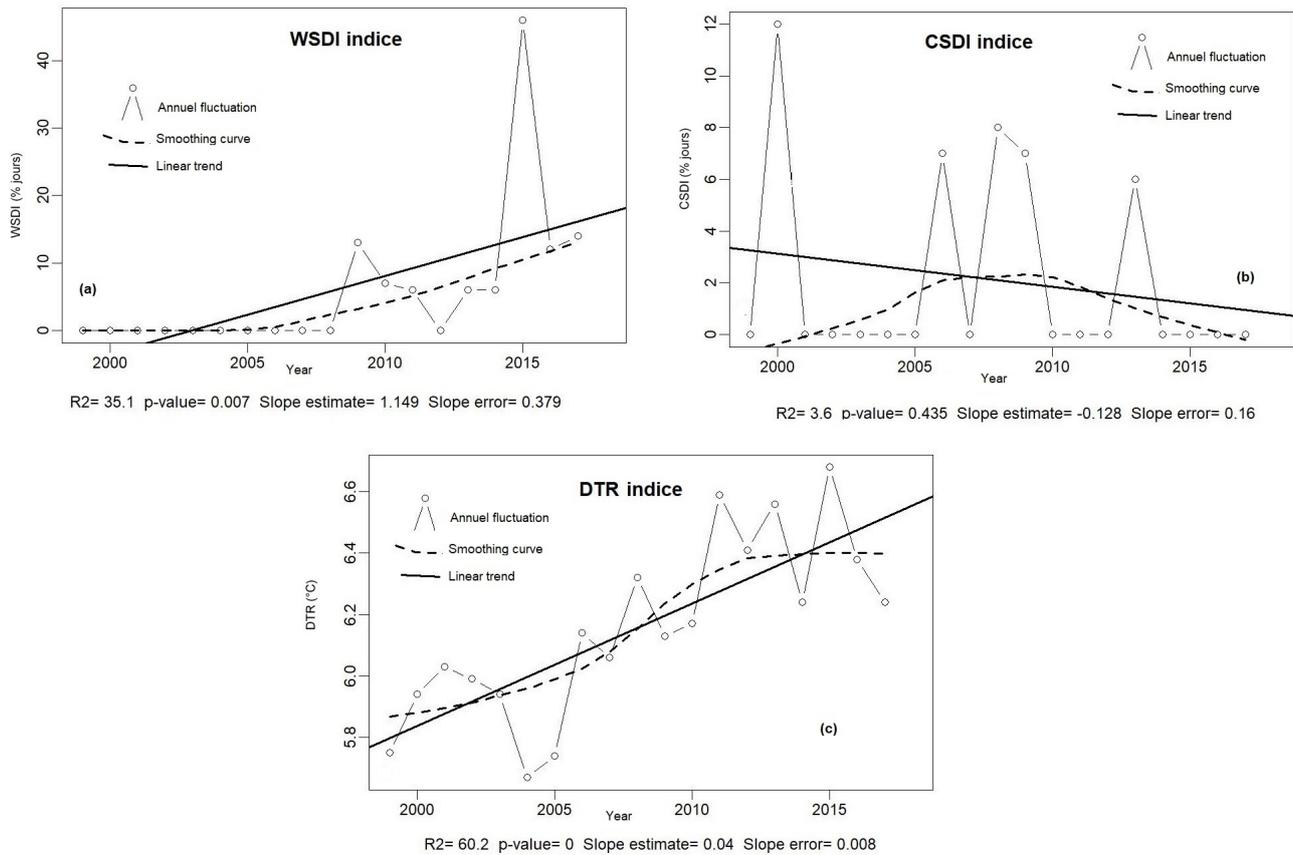


Figure 6. Trend of extreme temperature indices over the period 1999–2018 at Ferké 2 station: (a) WSDI indice, (b) CSDI indice and (c) DTR indice.

decrease in the number of heavy (R10 mm) and very heavy (R20 mm) precipitation days observed in this study would be due to the decrease in the frequency of daily rainfall of between 10 and 50 mm. Over the period 1999–2006, the number of heavy precipitation days (R10 mm) decreased from 40 to 28 d with an average decrease of 0.06 d yr^{-1} and the number of very heavy precipitation days (R20 mm) fluctuated between 26 and 2 d, with a slope of 0.083. From 2006 to 2018, the overall trend for both indices is downwards. Thus, dry seasons are getting longer while the rainy seasons are getting shorter. Further investigations are underway to analyse the impact of temperature and precipitation extreme variability on sugarcane yields in the Ferkessédougou sugar complexes.

Code availability. The Rclimdex software is freely available to the public. The manual and the software can be downloaded from the website: <https://github.com/ECCC-CDAS/RclimDex>, last access: 19 April 2021 (Chan, 2021).

Data availability. Precipitation and temperature data are not publicly available due to the structure's research policy. However, in the

framework of a research cooperation as in this study, these data can be provided free of charge.

Author contributions. ABY analyzed the data and wrote the manuscript; SGE and LAB assisted in the preparation of the manuscript and reviewed the document; GBO and IS contributed to the data processing in the RclimDex software, KLK and AD supervised the study through the CLIMSUCAF project and BCP facilitated access to the SUCAF-CI data.

Competing interests. The contact author has declared that neither they nor their co-authors have any competing interests.

Disclaimer. Publisher's note: Copernicus Publications remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Special issue statement. This article is part of the special issue "Hydrology of Large River Basins of Africa". It is a result of the 4th International Conference on the "Hydrology of the Great Rivers of Africa", Cotonou, Benin, 13–20 November 2021.

Acknowledgements. This work was carried out as part of the AFD-CLIMSUCAF project (Convention IRS/ECO/No. 499-2019). The authors would like to thank the CLIMSUCAF project and SUCAF-CI company for providing funds and data for this study.

References

- Abdalah, M.: Besoins d'observation pour les événements extrêmes et pour l'adaptation au changement climatique. In: Rapport de l'atelier régional sur le système mondial d'observation du climat pour le bassin Méditerranéen, Marrakech, Maroc, du 22 au 24 novembre 2005, 61–64, 2005.
- Aguilar, A., Aziz Barry, A., Brunet, M., Ekan, Fernandes, L. A., Massoukina, M., Mbah, J., Mhanda, A., Do Nascimento, D. J., Peterson, T. C., Thamba Umba, O., Tomou, M., and Zhang, X.: Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry and Zimbabwe, 1955–2006, *J. Geophys. Res.*, 114, 1–11, <https://doi.org/10.1029/2008JD011010>, 2009.
- Atchérémi, K. N. D., Jourda, J. P. R., Saley, M. B., Kouamé, K. J., and Balliet, R.: Etude de l'évolution des extrêmes pluviométriques et de température dans le bassin versant de rivière Davo (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) à partir de certains indices du logiciel RCLIMDEX, *Larhyss Journal*, 36, 99–117, 2018.
- Bhaga, T. D., Dube, T., Shekede, M. D., and Shoko, C.: Impacts of climate variability and drought on surface water resources in Sub-saharan Africa using remote sensing: A review, *Remote Sens.*, 12, 1–36, <https://doi.org/10.3390/rs12244184>, 2020.
- Chan, R.: RCLimDex, available at: <https://github.com/ECCC-CDAS/RCLimDex>, Github [code], last access: 19 April 2021.
- Diedhiou, A., Bichet, A., Wartenburger, R., Seneviratne, S. I., Rowell, D. P., Sylla, M. B., Diallo, I., Todzo, S., Toure, N. E., Camara, M., Ngatchah, B. N., Kane, N. A., Tall, L., and Affholder, F.: Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5 °C and 2 °C global warming, *Environ. Res. Lett.*, 13, 065020, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac3e5>, 2018.
- Djossou, M. L. D., Kodja, D. J., and Vissin, E. W.: Analyse de la Variabilité des Extrêmes Climatiques dans le Bassin Versant de la Pendjari à l'Exutoire de Porga au Bénin, *Int. J. Prog. Sci. Technol.*, 22, 176–182, 2020.
- Faye, C., Ndiaye, A., and Mbaye, I.: A comparative assessment of sequences of drought weather indices, by time scales and climate in Senegal areas, *J. Water Environ. Sci.*, 1, 11–28, 2017.
- Filahi, S., Mouhir, L., Tanarhte, M., and Trambly, Y.: Tendances et variabilité des événements extrêmes au Maroc, XXVIII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 1–4 Juillet 2015, Liège, Belgique, 463–468, 2015.
- Fontaine, B., Janicot, S., and Monerie, P.: Recent changes in air temperature, heat waves occurrences and atmospheric circulation in Northern Africa, *J. Geophys. Res.*, 118, 8536–8552, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50667>, 2013.
- Handmer, J., Honda, Y., Kundzewicz, Z. W., Arnell, N., Benito, G., Hatfield, J., Mohamed, I. F., Peduzzi, P., Wu, S., Sherstyukov, B., Takahashi, K., and Yan, Z.: Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems, in: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, edited by: Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D., Dokken, D. J., Ebi, K. L., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G.-K., Allen, S. K., Tignor, M., and Midgley, P. M., A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 231–290, 2012.
- Hountondji, Y. C., De Longueville, F., and Ozer, P.: Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960–2000, Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Environment and Climate Change, 26–27 August 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam, available at: <http://hdl.handle.net/2268/96112> (last access: 18 October 2021), 2011.
- Karimou-Barke, M., Ambouta, K., Sarr, B., and Tychon, B.: Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le Sud-Est du Niger, XXVIII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 1–4 Juillet 2015, Liège, 537–542, 2015.
- Kouakou, K. E., Kouadio, Z. A., Kouassi, F. W., Goula, B. T. A., and Savané, I.: Modélisation de la température et de la pluviométrie dans un contexte de changement climatique: cas de l'Afrique de l'Ouest, *Afr. Sci.*, 10, 145–160, 2014.
- Kouamé, Y. M., Soro, G. E., Kouakou, K. E., Kouadio, Z. A., and Meledje, N. E. H.: Scénarios des changements climatiques pour les précipitations et les températures en Afrique subsaharienne tropicale humide: Cas du bassin versant de Davo, Côte d'Ivoire, *Larhyss Journal*, 18, 197–213, 2014.
- Kouassi, A. M., Kouamé, K. F., Koffi, Y. B., Djé, K. B., Paturel, J. E., and Oularé, S.: Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire, *Cybergéo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, 513, 1–29, <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23388>, 2010.
- Ly, M., Traoré, S. B., Alhassane, A., and Sarr, B.: Evolution of some observed climate extremes in the West African sahel, *Weather Climate Extreme*, 1, 19–25, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.07.005>, 2013.
- Mali, S. C., Shrivastava, P., and Thakare, H. S.: Impact of weather changes on sugarcane production, *Res. Environ. Life Sci.*, 7, 243–246, 2014.
- New, M., Hewiston, B., David, B., Tsgia, S. A., Kruger, A., Manhinsue, A., Gomez, B., Coelho, C. A. S. D., Masisi, N., Kalulanga, E., Bulane, E., Fortunata, L., Mdoka, M. L., and Lajoie, R.: Evidence of trends in daily climate extremes over southern and West Africa, *J. Geophys. Res.*, 111, D14102, <https://doi.org/10.1029/2005JD006289>, 2006.
- N'Guessan, B. V. H., Adjakpa, T. T., Allechy, F. B., Youan Ta, M., Assa, Y. F., and Affian, K.: Variabilité et prévision des extrêmes climatiques dans le bassin de la Lobo (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire): Apport des chaînes de Markov et du générateur de temps mulgets, *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, 9, 44–54, <https://doi.org/10.35629/6734-0906024454>, 2020.
- Péné, C. B. and Assa, A. D.: Variations interannuelles de la pluviométrie et de l'alimentation hydrique de la canne à sucre en Côte d'Ivoire, *Sécheresse*, 14, 43–52, <https://doi.org/10.1029/2005JD006289>, 2003.
- Péné, C. B., Ouattara, M. H., and Koulibaly, S. G.: Late season sugarcane performance as affected by soil water regime at the yield formation stage on commercial farms in northern Ivory Coast,

- 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1–5 August, Brisbane, Queensland, Australia, 2010.
- Saithanu, K., Sittisom, P., and Mekpanyup, J.: Estimation of Sugar Cane Yield in the Northeast of Thailand with MLR Model, *Burapha Sci. J.*, 22, 197–201, 2017.
- Santos, C. A. C. D., Neale, C. M. U., Rao, T. V. R., and Silva, B. B. D.: Trends in indices for extremes in daily temperature and precipitation over Utah, USA, *Int. J. Climatol.*, 31, 813–1822, <https://doi.org/10.1002/joc.2205>, 2010.
- Soro, T. D., Kouakou, B. D., Kouassi, E. A., Soro, G., Kouassi, A. M., Kouadio, K. E., Yéi, M.-S. O., and Soro, N.: Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire), *Vertigo*, 13, 1–22, <https://doi.org/10.4000/vertigo.14468>, 2013.
- Wilhite, D. A.: Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. Drought: A Global Assessment Routledge, London, UK, 2000.
- WMO: Troisième conférence mondiale sur le climat, *Bulletin de l'OMM*, 58, 139–223, 2009.
- Yapo, A. L. M., Diawara, A., Yoroba, F., Kouassi, K. B., Sylla, B. M., Kouadio, K., Odoulami, R. C., and Tiémoko, T. D.: Twenty-First Century Projected Changes in Extreme Temperature over Côte d'Ivoire (West Africa), *Int. J. Geophys.*, 1–19, <https://doi.org/10.1155/2019/5610328>, 2019.
- Yapo, A. L. M., Diawara, A., Kouassi, B. K., Yoroba, F., Sylla, M. B., Kouadio, K., Tiémoko, D. T., Koné, D. I., Akobé, E. Y., and Yao, K. P. A. T.: Projected changes in extreme precipitation intensity and dry spell length in Côte d'Ivoire under future climates, *Theor. Appl. Climatol.*, 140, 871–889, <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03124-4>, 2020.
- Zhang, X. and Yang, F.: RCLimDex (1.0): User Manual, Climate Research Branch Environment Canada, Downsview, Ontario, Canada, 23 pp., 2004.

Hydrological Characterization of Water Resources Used for Sugarcane Production in the Sugar Complexes of Ferkessedougou (North of Côte d'Ivoire)

Affoué Berthe Yao^{1*}, Sampah Georges Eblin¹, **Gla Blaise Ouedé¹**, Kouakou Lazare Kouassi¹, Do Ange Désiré Soro¹, Arona Diedhiou², Bi Crépin Péné³

¹Laboratory of Environmental Sciences and Technologies, UFR Environment, Jean Lorougnon Guédé University, Daloa, Côte d'Ivoire

²Laboratory NEXUS "Climate, Water, Agriculture, Energy Nexus and Climate Services" Research and Development Institute, Felix Houphouët Boigny University, Abidjan, Côte d'Ivoire

³Research and Development Department, SUCAF-CI, Ferkessedougou, Côte d'Ivoire

Email: *y_berth@yahoo.fr

How to cite this paper: Yao, A. B., Eblin, S. G., Ouedé, G. B., Kouassi, K. L., Soro, D. A. D., Diedhiou, A., & Péné, B. C. (2021). Hydrological Characterization of Water Resources Used for Sugarcane Production in the Sugar Complexes of Ferkessedougou (North of Côte d'Ivoire). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 9, 1-15. <https://doi.org/10.4236/gep.2021.912001>

Received: October 5, 2021

Accepted: November 30, 2021

Published: December 3, 2021

Copyright © 2021 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Water resources, although renewable, are limited and threatened by climate change and anthropic activities. Assessment and forecasting of these resources can provide valuable information for water resource planners. This study aims to quantify the surface water resources used for sugarcane production in sugar complexes of Ferkessedougou. This is based on the morphological characterization of the river Morrison and Lopkoho dams and on extreme daily flow probability of occurrence estimation using frequency analysis method. The bathymetric survey showed that the Morrison Dam impoundment had a maximum depth of 11.98 m; a water capacity of 11,656,735.5 m³. For the Lokpoho dam, the reservoir had a maximum depth of 8.82 m, which corresponds to a water volume of 4,354,531.5 m³. Nevertheless, the water capacity of these reservoirs is greatly reduced by a large volume of sediment estimated at 1,013,058.96 m³ for Morrison and 599,740 m³ for Lokpoho. Statistical analysis of maximum daily flows shows that flows between 73.9 and 100 m³/s have the potential to occur every five years at the Route Korhogo Badikaha hydrometric station. The recurrence of the decennial (298 m³) and quinquennial (248 m³) flows shows the importance of the flood flows of the Bandama River. It also shows that the low water levels of the Bandama are very pronounced. The minimum flow that SUCAF-CI water managers should expect every five years is 1.36 m³/s and the ten-year low flow is 2.10 m³/s. These results are indicators of water scarcity risks and could guide decision making in the Fer-

kessedougou sugar complexes.

Keywords

Bathymetric Survey, Flow Quantile, Return Period, Sugar Complexes, Côte d'Ivoire

1. Introduction

The dwindling of water resources poses a threat potentially important to the environment and economic activities (UNESCO, 2020). Among the main factors responsible for this situation are natural uncertainties observed in the climates, as well as the anthropic activities of a growing population (IPCC, 2014). Indeed, successive periods of drought since the 1970s caused waves of famine in West Africa due to crop loss and livestock decimation (Kouassi et al., 2017). Like the countries of West Africa, these impacts of climate changes have been strongly felt in Côte d'Ivoire due to the fact that its economy is essentially based on rain-fed agriculture and its strong dependence on rivers flows used for agricultural and industrial production and for water supply.

This is the case of the Sucrerie d'Afrique-Côte d'Ivoire (SUCAF-CI), an agro-industrial enterprise located in the departments of Ferkessedougou and Tafire, in the northeast of Côte d'Ivoire. This company exploits water of the Bandama River for sugarcane irrigation, sugarcane manufacturing and domestic needs through two water reservoirs (Morrison and Lokpoho) that were built to support the water supply of the sugar cane perimeters of Ferkessedougou. In recent years, managers of sugar estates have experienced enormous difficulties in meeting water needs due to decreasing flows of the Bandama River and the drying up of water reservoirs (Pene et al., 1997; Pene et al., 2001). This rapid drying up of reservoirs and silt deposits observed in the bottom of the reservoirs show signs of siltation and thus a reduction of the capacity of the reservoirs. Indeed, siltation and eutrophication of reservoirs cause flooding, significant changes in physicochemical parameters and quick development of aquatic plants. Despite the dangers inherent in the lakes filling over time (Ryding & Rast, 1994), no sedimentological and morphological studies have been undertaken on the lakes of Ferkessedougou sugar complex dams. The work carried out by the CCC UE/CI (2013) was limited to an estimate of the volume of water in reservoirs without really characterizing the bottom of these lakes. In addition, the increase of the frequency of extreme events such as droughts, floods and very intense rainfall, mentioned by the GIEC (2012), highlights the need to make a frequency analysis of flood and low water flows in order to provide decision support in the research processes of strategies to fight hydro-climatic risks. Knowing that water scarcity is a factor reducing sugarcane productivity, this study is conducted to evaluate the current water availability of the reservoirs and to estimate the quantiles of extreme rainfall and flow and their probability of occurrence in order to consti-

tute a decision support tool aiming at allowing SUCAF-CI to dispose of the water resource in a sustainable way. The study is based on the morphological characterization of water reservoirs and the frequency analysis of flood and low water flows of the Bandama River at the Route Korhogo Badikaha hydrometric station.

2. Study Area

The Upper Bandama watershed at the Korhogo-Badikaha road station is located between longitudes 5°00' and 6°20' West and latitudes 9°00' and 10°20' North (**Figure 1**). It covers the square degrees of the Poro, Tchologo and part of the Bagoue regions with an estimated area of 9850 km² and represents about 10% of the entire Bandama River watershed.

The study area is under the influence of the transitional tropical regime characterized by two major seasons (Soro et al., 2013). A long rainy season from April to October, with average monthly rainfall ranging from 129.3 to 250.4 mm and a long dry season from November to March with average rainfall ranging from 1.9 to 82.5 mm. Average monthly temperatures range from 25°C in August to 29°C in March.

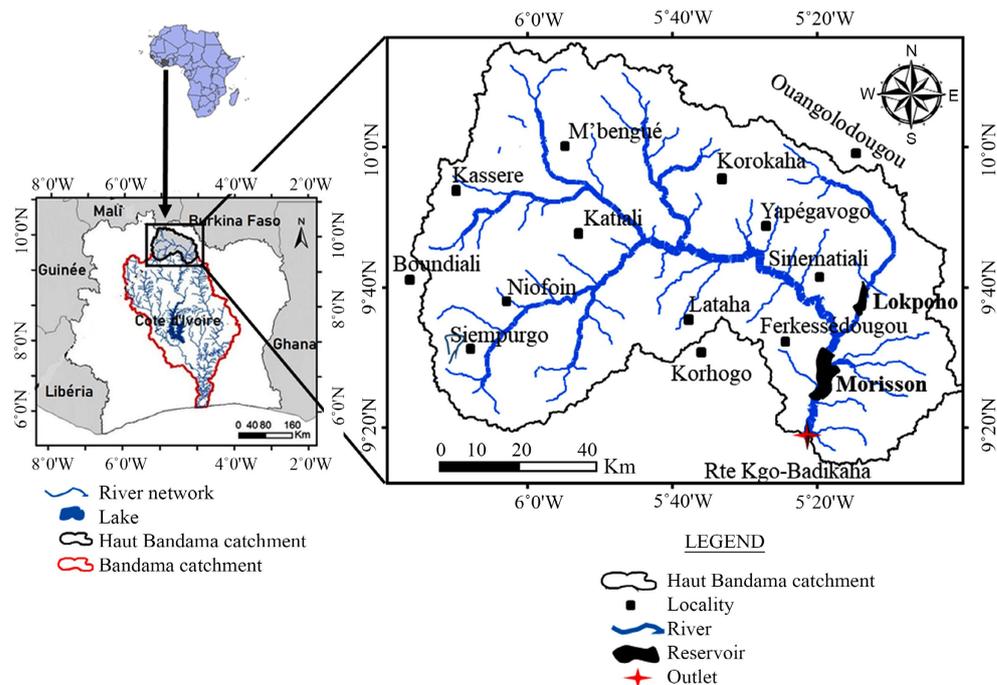


Figure 1. Location of the upper Bandama watershed.

3. Materiel and Methods

3.1. Materiel

The material is composed of data collected from national agencies and data measured in field. The data collected are the hydrometric data. Hydrometric data include flows data of the Bandama River at the Korhogo-Badikaha road sta-

tion from 1975 to 2000; with a reconstruction of the missing data by rainfall-flow modeling using the GR4J model (Yao et al., 2012). This treatment required rainfall data recorded at the stations of Boundiali, M'Bengue, Korhogo and Ouangolo to calculate the average rainfall in the Upper Bandama watershed. These rainfall data come from the Society for the Operation and Development of Airports, Aeronautics and Meteorology (SODEXAM)). Data measured in field concern bathymetric surveys realised on Morrison and Lokpoho dams in 2013 by SUCAF-CI and the 20 and 21st February 2020 in the context of a project named "Climate services for sustainable sugarcane production and use in Africa" (CLIMSUCAF).

3.2. Methods

3.2.1. Assessment of Water Availability in Reservoirs

➤ Morphological characterization of the Morrison and Lokpoho reservoirs

The morphology of the bottom of the Morrison and Lokpoho dams (Figure 2) was studied using bathymetric surveys. These surveys were carried out using a LOWRANCE Elite 9 Ti echosounder; which is a device for measuring the depth of the sea bed or lake. The depth is deduced from the measurement of the travel time of an acoustic signal reflected by the bottom.

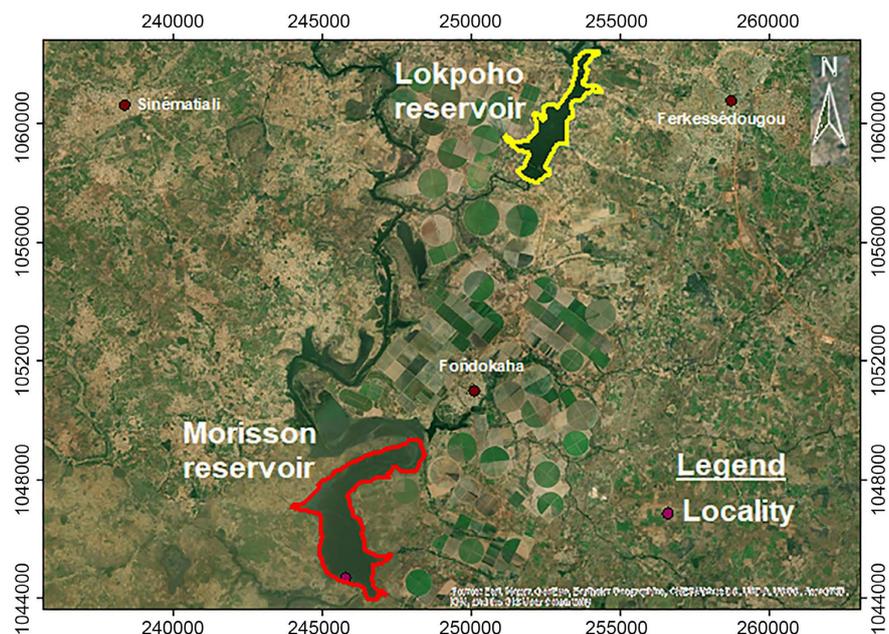


Figure 2. Overview of the bathymetric survey area (Google Earth, 2020).

The soundings were taken at a frequency of 455 kHz, to avoid that transmitted signals not to penetrate the silt (Kouassi et al., 2007). The depths obtained thus represent the distance between the position of the echo sounder transducer and the water-sediment interface. Water travel was conducted using a speedboat in both the longitudinal and transverse directions of the stream. These surveys were carried out over a length of approximately 3855 m for the Morrison Dam

and 3815 m for the Lopkoho Dam. The interpolation method used was IDW (Inverse Distance Weighting) with an X and Y space step of 150 m. It is a local deterministic interpolation technique that calculates the value of a point by averaging the values of the points located in the vicinity weighted by the inverse of the distance to the calculated point: the closer the points are, the greater the weighting assigned (Drouin & Saint-Laurent, 2010).

➤ **Establishment of height-volume and height-surface curves**

These impoundment contours give the different water volumes and areas for each impoundment contour (Nshimirimana, 2010). The partial volume V_i between two successive contours is given by (1):

$$V_i = \frac{(S_{i-1} + S_i) \times H}{2} \quad (1)$$

V_i : Volume of water between the contours $i - 1$ and i ;

H : Height difference between the two contours $i - 1$ and i , i.e. $H_i - H_{i-1}$;

S_i : Surface of the water body corresponding to the curve $i (H_i)$;

S_{i-1} : Surface of the water level corresponding to the curve $i - 1 (H_{i-1})$

Thus, by applying these relationships for each height of the water body, the area of the water body is determined as a function of its height (Nshimirimana, 2010). In our study, these calculations were performed using COVADIS software. COVADIS is a software using the graphic interface of Autocad with in the background a calculation process using the usual topographic formulas. It proceeds by modelling the terrain given to it by linear interpolation.

Using the Height-Volume curve of the reservoir ($H = f(V)$), the Height-Surface curve ($H = f(S)$) was constructed.

➤ **Volume and rate of sediment in the two dams**

The 2013 and 2020 bathymetric surveys provided sediments volumes. Thus, the difference between these volumes provides the current sediment volume in the reservoir in 2020. Then the rate (τ) of deposited sediment is calculated by (2) (Kouassi, 2007):

$$\tau = \left(\frac{B_{2020}}{B_{2013}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (2)$$

With:

τ : Sediment rate (%)

B : Volume of sediment (m^3)

n : Year difference between 2013 and 2020

3.2.2. Determination of the Probability of Occurrence of Extreme Flows

This study is based on frequency analysis, which consists in determining the probabilities of occurrence and the return periods (forecast). The main objective of this statistical method is to use measurements of past events to estimate future probabilities of occurrence. The frequency analysis is used, in particular, to estimate the magnitude of the temporal event xT to which is associated a return

period xT (quantile of return period T or of probability at exceedance $T = 1/T$ (Bobée, 1999)). The estimate of quantile xT value is obtained by fitting a probability law $F(x; \theta)$ to a sample of n observations, $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ where θ represent a vector of parameters associated at the probability distribution F . The different steps on frequency analysis are as follows:

➤ **Sampling**

The sampling of extreme flows concerned the flood (QMAXAN) and low water flows (QMIN) recorded at the hydrometric station Route Korhogo-Badikaha from January to December over the period 1975-2000.

➤ **Choice of models**

The choice of the frequency model was made on the basis of graphical comparison and numerical comparison criteria (Kouassi et al., 2019). The graphical method allows one to graphically visualize the goodness of fit of a given law to a sample of data. The best probabilistic models are those whose curve passes through the maximum number of observations and whose Confidence Interval (CI) encompasses the maximum number of observations. This visual acuity-dependent graphical comparison method does not allow for the selection of the appropriate model for fitting the variables under study. Thus, in order to minimize the risk of error in the choice of the best fitting model, a second selection method based on the numerical comparison criteria of the laws must be used. Within the framework of this study, the choice of the frequency model was made by means of two approaches which are the graphic approach and that of the comparison criteria (AIC and BIC). This choice was made among four (04) frequency models (statistical laws) for flood flow series. These are: the general law of extreme values (GEV), the Gumbel law (EV1), the Weibull law (W) and the Lognormal law (LN). For the low-flow sample (minimum flows), the laws competed for are the Exponential law and the Gamma law because the fit of the other laws was negative (Catalogne, 2012). The maximum likelihood method was used to estimate the parameters of these laws. The application of these laws allows us to assess which one best fits a time series of rainfall and discharge. The ideal distribution is chosen using graphical and numerical criteria. For each sample, the test of independence, stationarity and homogeneity were previously analyzed using HYFRAN software. The HYFRAN-PLUS software allows the fitting of a large number of statistical distributions to a set of data that verify the assumptions of independence, homogeneity and stationarity (see DAS publications). It is designed to clearly present the steps involved in fitting a statistical distribution to a random sample. These steps can be found in Soro (2011).

➤ **Comparison criteria**

The aim of these criteria is to find a compromise between a sufficient parameterization to fit a probability distribution to the observations and the least complex parameterization possible. To be able to compare probabilistic models by comparison criteria, we set equal a priori probabilities for all distributions. Then, we specify a return period (T). Thus, the a posteriori probability is calculated from the a priori probability (Soro, 2011). The Akaike Information Crite-

rion (AIC) (3) and the Bayesian Information Criterion (BIC) (4) are also calculated. The best probabilistic model is the one with low AIC and BIC values and the highest posterior probability (Soro, 2011). The BIC and AIC criteria are calculated as follows:

Akaike Information Criterion (AIC)

$$\text{AIC} = 2 \log(l) + 2k \log(n) \quad (3)$$

With l likelihood; k : number of parameters; n : sample size

Bayesian information criterion (BIC)

$$\text{BIC} = -2 \log(l) + 2k \quad (4)$$

With l likelihood; k : number of parameters

o **Model validation test**

Once the fitting model is chosen, it must be subjected to a series of tests to verify its fit to the chosen sample. In this study, the chi-square test (χ^2) was used.

The HYFRAN (Hydrological Frequency Analysis) software developed by INRS-EAU of Canada was used to implement the frequency analysis.

4. Results

4.1. Water Availability of Reservoirs

4.1.1. Analyze of Morphology of the Reservoirs

Figure 3 and **Figure 4** show the bathymetric maps of the Morrison and Lokpoho impoundment. These maps were made using bathymetric surveys conducted in February 2020. For the Morrison reservoir (**Figure 3**), the 292.23 m water level was used as the reference level. The maximum depth sounded is 11.98 m and the area of the bathymetric survey is 472.92 hectares as of 20/02/2020. The bottom of the reservoir is characterized by a morphology disturbed by abrupt slope variations in the project area. These slopes reach 24° in places.

For the Lokpoho impoundment (**Figure 4**), the bottom is slightly less rugged. On this bathymetric map, there is a main north-south flow channel leading to the water intake. Depths vary gradually from place to place from upstream to the dike. The depths are less important and reach 8.82 m. The 296.97 m water level was chosen as the reference level and the area of the bathymetric survey is 312.93 hectares as of 21/02/2020. The bottom of the reservoir is also characterized by a morphology disturbed by abrupt slope variations in the project area. These slopes reach 80° in places.

4.1.2. Current Capacity of the Reservoirs

Figure 5 shows respectively the evolution of the volume of water and the average surface area of the reservoirs as a function of water depths. These curves show a logarithmic curve with a height of 292.23 m and 296.97 m respectively for Morrison and Lokpoho. For the Morrison reservoir, this water level corresponds to an area of 32.000 m² (**Figure 5(a)**) and a volume of 11,656,735.5 m³ on 20/02/2020 (**Figure 5(b)**).

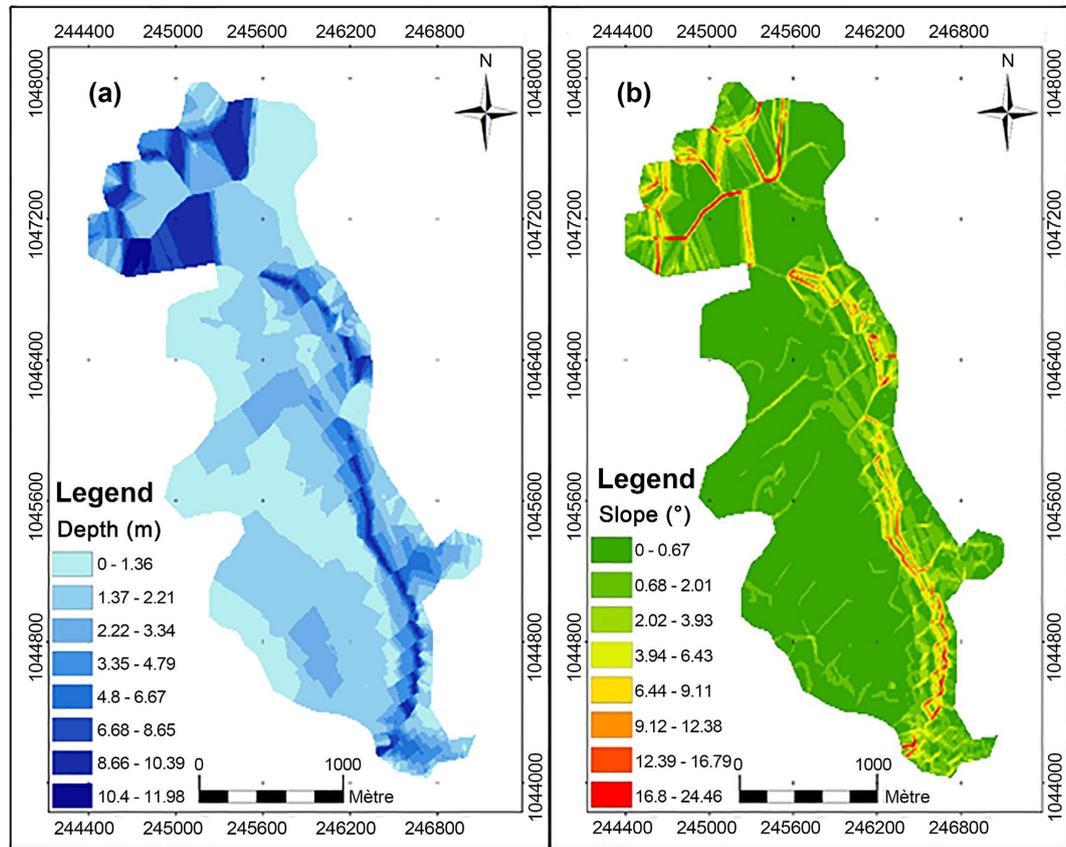


Figure 3. Bathymetric map of Morrison Reservoir: depths (a), slopes (b).

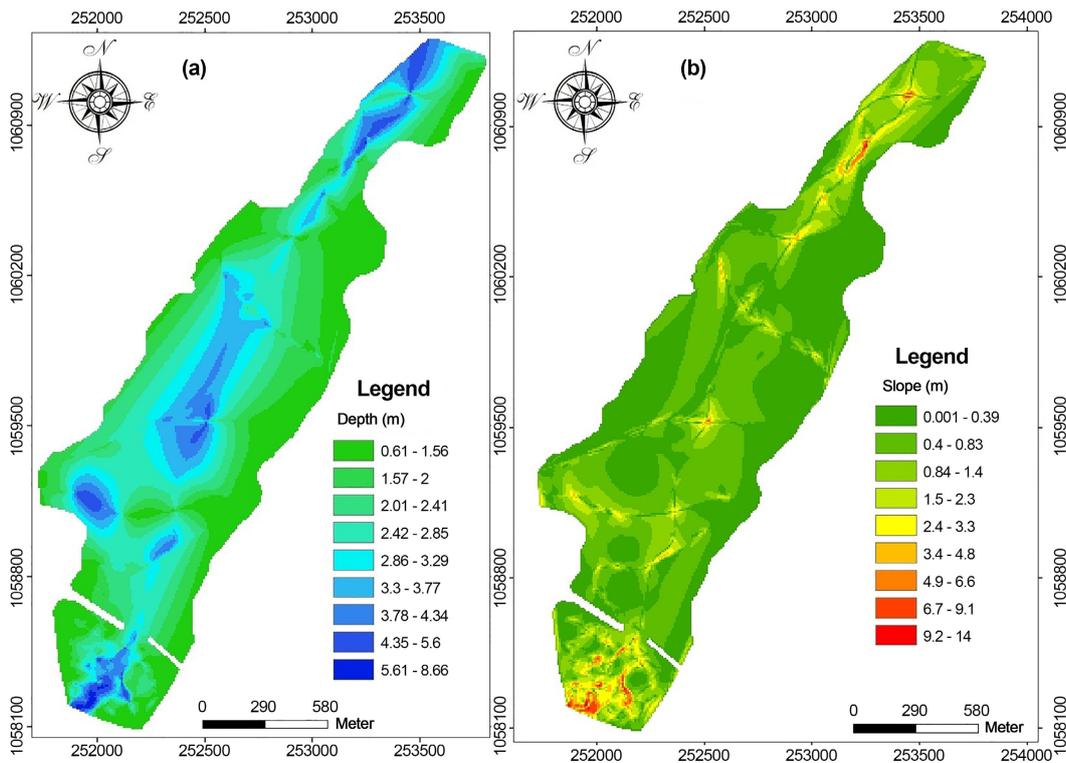


Figure 4. Bathymetric map of the Lokpoho reservoir: depths (a), slopes (b).

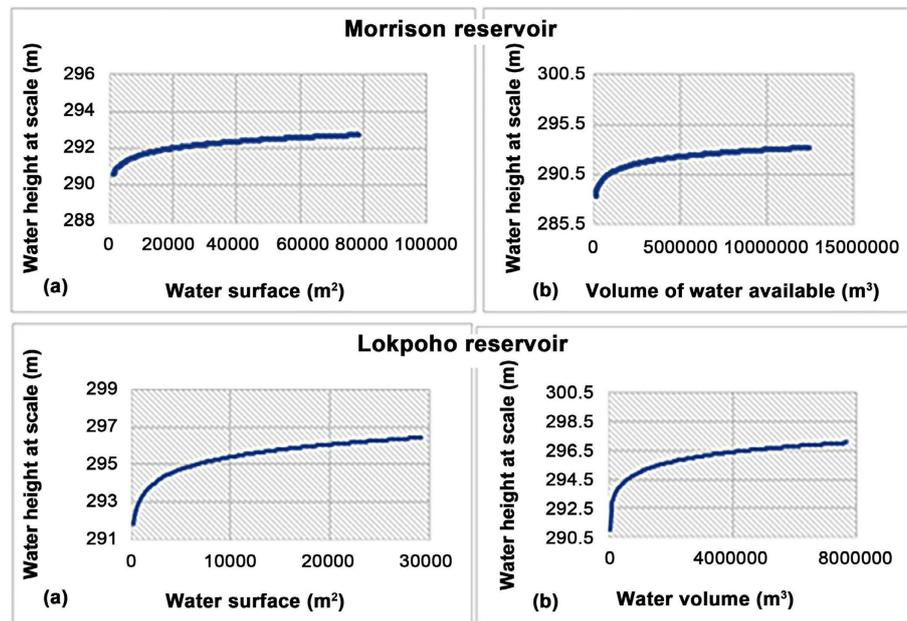


Figure 5. Reservoir capacity: (a) Height-surface curve; (b) height-water volume curve.

And for the Lokpoho reservoir, this water level corresponds to a surface of 27,000 m² and a volume of 4,354,531.5 m³ on 21/12/2020.

4.1.3. Analysis of the Sediment Content of the Reservoirs

The sediment levels in the two impoundments between 2013 and 2020 are recorded in **Table 1**. Analysis of the results shows that the sediment rate in Morrison impoundment is lower than that in Lokpoho. Indeed, for the Morrison reservoir, sediments volume varies from 875,900 m³ in 2013 to 1,013,058.96 m³ in 2020 or a sedimentation rate of 2.1%. For Lokpoho reservoir, the results of sediments volume in 2013 is 508,000 m³ and in 2020, this volume is estimated at 599,740,543.3 m³ or a sedimentation rate of 2.4%.

Table 1. Sediment levels in the two reservoirs.

DAMS	Volume of sediment (m ³)		Rates (%)
	2013	2020	
Morrison	875,900	1,013,058.96	2.1
Lokpoho	508,000	599,740,543.3	2.4

4.2. Probability of Occurrence of Extreme Flows

4.2.1. Adjustment of Maximums Flows

The maximum daily flows recorded at the Korhogo-Badikaha station follow the GEV and Gumbel laws (**Figure 6**). Indeed, the observations are all within the Confidence Interval and, moreover, remarkably close to the curve representing the probabilistic models mentioned above. These results are confirmed by those in **Table 2**, which present the ranking of the probability laws fitted to the annual maximum flow series of the Korhogo-Badikaha road station.

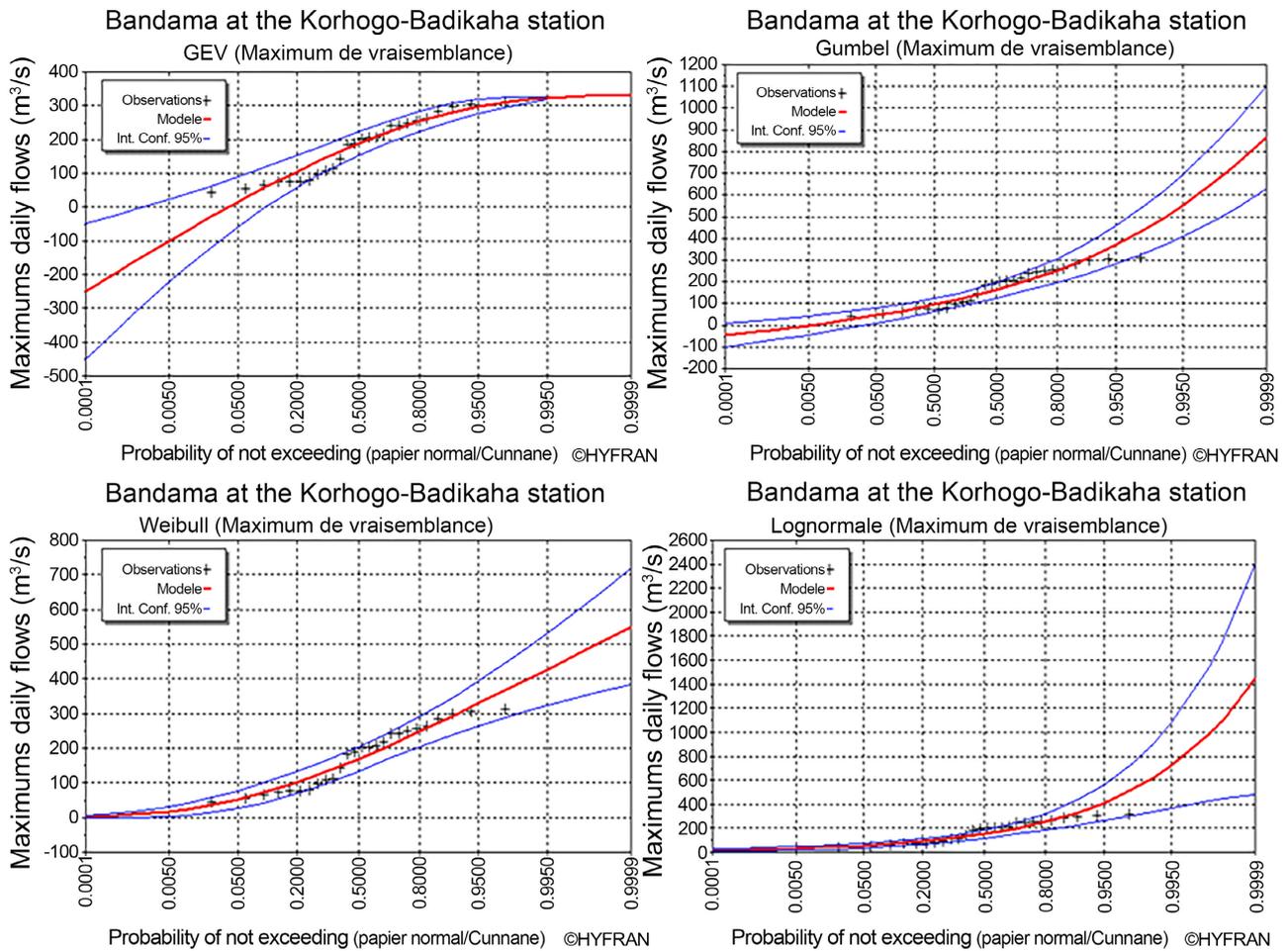


Figure 6. Graphical comparison of the adjustment of the flood series at the Korhogo Badikaha station.

Table 2. Comparison of statistical laws for the adjustment of maximum annual rainfall at the Korhogo-Badikaha road station.

Laws	Number of parameters	P (Mi/x)	Comparison criterion		Ranking
			BIC	AIC	
Weibull	2	64.37	310.438	307.922	1
GEV	3	13.43	313.572	309.798	2
Gumbel	2	12.69	313.687	311.1713	3
Lognormal	2	9.51	314.264	311.748	4

4.2.2. Adjustment of Minimum Daily Flows

At the level of the low water flows, among the competing laws, only the Gamma and Exponential laws were able to fit the observations (Figure 7). Thus, the comparison of the two laws by the BIC and AIC criteria show that the Gamma law comes first with 58.24% chance that the sample comes from this law (Table 3). The criteria of BIC (58.57) and AIC (51.06) are lower than those of the Exponential law.

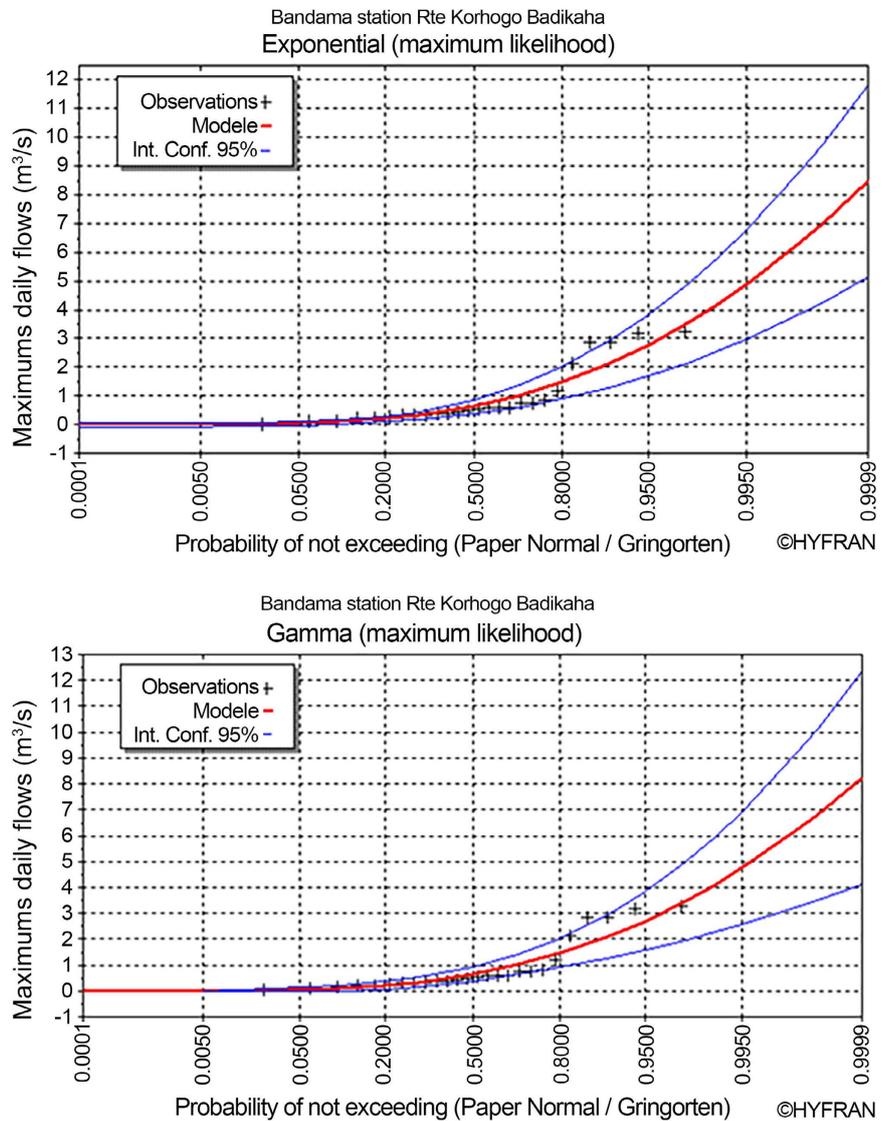


Figure 7. Graphical comparison of the adjustment of the low water series at the Korhogo Badikaha station.

Table 3. Comparison of statistical laws for the adjustment of minimum annual flows at the Korhogo-Badikaha road station.

Statistical law	Number of parameters	P (Mi/x)	Comparison criterion		Ranking
			BIC	AIC	
Gamma	2	58.24	53.578	51.0622	1
Exponential	2	41.76	54.244	51.727	2

4.2.3. Flow Quantiles Analysis

Table 4 summarizes the quantiles of minimum and maximum flows estimated according to the laws that came first in the adjustment. It can be seen that flood and low-flow rates increase with return periods. Confidence intervals are also estimated to evaluate the uncertainty associated with the estimates.

Table 4. Quantiles of various return periods of flood and low water flows at the Korhogo-Badikaha station.

Return period (years)	Estimated floods (m ³ /s)	Confidence interval	Estimated drawdowns (m ³ /s)	Confidence interval
100	401	[308 - 494]	5.27	-
50	372	[291 - 453]	4.20	-
20	330	[264 - 395]	2.94	[1.24 - 4.64]
10	292	[238 - 346]	2.10	[1.04 - 3.15]
5	248	[204 - 292]	1.36	[0.68 - 2.03]

5. Discussion

The bathymetric study of the reservoirs used for sugarcane irrigation and the satisfaction of various water uses in the Ferkessedougou sugar complexes showed that the Morrison reservoir has a maximum depth of 11.98 m as of 20/02/2020. At this date, the water capacity is estimated at a volume of 11,656,735.5 m³; for the Lokpoho reservoir, the maximum depth is 8.82 m, i.e. a volume of 4,354,531.5 m³ at the date of 21/02/2020. Compared to the results of the work of the CCC UE/CI in 2013, we note a difference in the maximum depths sounded and the volume of water assessed for the two reservoirs. Indeed, a maximum depth of 12.2 m corresponding to a water volume of 1,590,000 m³ was obtained for Morrison and while our results give a volume of 11,656,735.5 m³. It is the same for Lokpoho where a depth of 6.12 m or a volume of water available of 1,081,722 m³ had been found by the CCC UE/CI in 2013 (CCC UE/CI, 2013). The difference could be related to the dates of the bathymetric surveys and the water level selected for the calculations. Indeed, the bathymetric surveys were carried out in the month of February while during this period, the volumes of water withdrawn for sugarcane irrigation are less important contrary to the month of May-June (the 2013 surveys were carried out on 17/05/2013 (Lokpoho) and 06/06/2013 (Morrison)) and which is located in the major irrigation campaign where the needs of sugarcane are important which leads to a considerable decrease in the volume of water in the reservoirs.

The sediment rates obtained are 2.4% and 2.1% for Lokpoho and Morrison, respectively. These results are consistent with Tsanang (2016) who showed that the dams (Lokpoho and Morrison) lose more than 2.5% and 1.5% of their capacities every ten years, respectively, which compromises the sustainable management of these waters during the irrigation seasons. Furthermore, a comparison between the two sediment rates shows that the sediment rate for Lokpoho is higher than for Morrison. This could be explained by the presence of a high slope for Lokpoho (90°) and a low slope for Morrison (24°). It is important to remember that the siltation of the reservoirs over the years could lead to the disappearance of the water body in the years to come if nothing is done to secure the structures.

The frequency analysis of the annual maximum daily flows allowed to esti-

mate the flood flows having a probability to occur at the Korhogo Badikaha road station. It emerges from this study that the maximum daily flows between 73.9 and 100 m³/s have the possibility of occurring every five years. Also, the decennial floods vary between 92.9 and 143 m³/s while the fiftieth floods could vary between 122 and 215 m³/s. For 100-year floods, the maximum annual daily flows vary from 133 to 249 m³/s. At this same station, [Brida \(2008\)](#) estimated the wet decennial flood at 40.2 m³/s and the dry decennial at 6.52 m³/s. We note a discrepancy in the results related to the sample analyzed. Indeed, the maximum monthly annual flows represent the average of the 12 months of flows of a year. Although the mean monthly modulus is a very significant feature, its great inter-annual variability in tropical areas induces a great loss of information in terms of hydrological risk. The centennial minimum flow is 5.27 m³/s; the fifty-year low flow is 4.20 m³/s. The decadal flow could be 2.10 m³/s, with a confidence interval between 1.04 m³/s and 3.15 m³/s.

6. Conclusion

This study is being conducted to assess the current water availability of the reservoirs and to estimate the quantiles of extreme rainfall and flow and their probability of occurrence in order to provide a decision-making tool for water management in the Ferke sugar complexes.

As of 20 February 2020, the water capacity of the Morrison Dam is estimated at 11,656,735.5 m³ with a surface area of 32,000 m². As for the Lokpoho dam, the volume of water is estimated at 4,354,531.5 m³ for a surface area of 27,000 m². This large water capacity of the reservoirs is threatened by sedimentation. The volume of sediment in Morrison Reservoir varies from 875,900 m³ in 2013 to 1,013,058.96 m³ in 2020, i.e. a sedimentation rate of 2.1. For the Lopkoho reservoir, the volume of sediment obtained in 2013 is 508,000 m³ and in 2020, this volume is estimated at 599,740.54 m³, i.e. a sedimentation rate of 2.4. Major floods of the order of 73.9 and 100 m³/s could occur every five years at the Korhogo route Badikaha station. Major floods of the order of 73.9 and 100 m³/s could occur every five years at the Korhogo station, Badikaha road. During dry periods, the minimum flow that can be observed every ten years is 2.10 m³/s. These results serve as an indicator for better management of water resources in the Ferkessédougou sugar complexes.

Acknowledgements

This work was carried out as part of the AFD-CLIMSUCAF project (Convention IRS/ECO/No. 499-2019). The authors would like to thank the CLIMSUCAF project and SUCAF-CI company for providing funds and data for this study.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

References

- Bobée, B. (1999). Estimation des événements extrêmes de crue par l'analyse fréquentielle: Une revue critique. *La Houille Blanche*, 85, 100-105.
<https://doi.org/10.1051/lhb/1999090>
- Brida, A. B. (2008). *Elaboration de l'Atlas Hydro-Climatique de la Côte d'Ivoire: Etude statistique des écoulements de cours d'eau et bilan hydrique*. Mémoire de DEA, Université Abobo-Adjamé.
- Catalogne, C. (2012). *Amélioration des méthodes de prédéterminations des débits de références d'étiages en des sites peu ou non jaugés*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble.
- 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, Ferkessédougou, Côte d'Ivoire), Cellule de Coordination de la Coopération CI/UE*. Ministère de l'Agriculture de Côte d'Ivoire.
- Drouin, A., & Saint-Laurent, D. (2010). Comparaison des méthodes d'interpolation pour l'élaboration de modèles numériques d'élévation de haute précision dans la représentation micro-topographique des plaines inondables. *Hydrological Sciences Journal*, 55, 526-539.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2010.481088>
- GIEC (2012). *Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Cambridge University Press.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1-151). IPCC.
- 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, K. M., Meledje, N. H., Koffi, Y. B., Kouassi, K. L., Ahoussi, K. E., Oga, Y. M. S., Biémi, J., & Soro, N. (2019). Modélisation statistique des extrêmes de pluies à différentes échelles de temps: Comparaison des approches théorique et pratique. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, 34, 368-388.
- Kouassi, K. L. (2007). *Hydrologie, transport solide et modélisation de la sédimentation dans les lacs des barrages hydroélectriques de Côte d'Ivoire: Cas du lac de Taabo*. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé.
- 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 & Nature*, 4, 93-103.
<https://doi.org/10.4314/scinat.v4i1.42134>
- Nshimirimana, G. (2010). *Caractéristiques du barrage-aménagement hydroagricole de moutori (dano) et scénarios d'utilisation de l'eau pour une irrigation efficiente et durable. Mémoire d'ingénieur*. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et Environnement.
- Péné, B. C., Assa, A. B., & Déa, G. B. (2001). Interaction eau d'irrigation-variétés de canne à sucre en conditions de rationnement hydrique. *Cahiers Agricultures*, 10, 243-253.
- Péné, C. B., Chopart, J. L., & Assa A. (1997). Gestion de l'irrigation à la parcelle en culture de canne à sucre (*Saccharun officinarum* L.) sous climat tropical humide, à travers le cas des régions Nord et Centre de la Côte d'Ivoire. *Sécheresse*, 8, 87-98.
- Ryding, S. O., & Rast, W. (1994). *Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et réservoirs*.

Science de l'environnement (9th ed.). Masson.

- Soro, G. E. (2011). *Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé.
- 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, 1-22.
- Tsanang, T. P. R. (2016). *Diagnostic de système d'irrigation dans les parcelles irriguées, SUCAF-CI. Mémoire d'Ingénieur*. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et Environnement.
- UNESCO, & UN-Water (2020). *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. UNESCO.
- Yao, A. B., Goula, B. T. A., Kouadio, Z. A., Kouakou, K. E., Kane, A., & Sambou, S. (2012). Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide: Cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, 19, 136-157.

RÉSUMÉ

Résumé

Les différentes pressions anthropiques et climatiques, et surtout l'augmentation rapide de la population, ont conduit à une pression accrue sur les ressources en eau agricole, entraînant une insuffisance de la production agricole. C'est le cas de la SUCAF-CI, dans le nord de la Côte d'Ivoire, qui n'arrive pas à satisfaire sa part de la demande nationale en sucre, estimée à environ 120 000 tonnes par an. L'objectif de cette étude est d'analyser la relation entre la variabilité climatique, la dynamique de l'occupation des sols et la réponse hydrologique dans le temps et dans l'espace sur le bassin versant du Haut-Bandama, afin d'optimiser la production de la canne à sucre dans les complexes sucriers de Ferkessédougou.

Les approches basées sur la caractérisation du changement climatique, la dynamique de l'occupation des sols et la modélisation des écoulements dans le bassin versant du Haut-Bandama ont montré, pour le premier, à travers l'application des chaînes de Markov d'ordre 1 et 2, une récurrence de plus en plus fréquente des sécheresses de deux et trois années consécutives d'ici 2050. Les modèles climatiques utilisés indiquent une baisse des précipitations suivie d'une diminution des écoulements de 16,74 % sur la période 2021-2050, à l'exception du modèle RCA4, qui prévoit une hausse de la pluviométrie suivie d'une augmentation des écoulements de 6,05 %.

Concernant la dynamique de l'occupation des sols, l'analyse a révélé une tendance à la dénudation des sols, avec la dégradation du couvert végétal, ce qui entraîne une augmentation du coefficient de ruissellement, passant de 31 % à 36 % respectivement en 2020 et 2050.

La modélisation hydrologique à l'aide du modèle SWAT a mis en évidence l'impact de la dynamique de l'occupation des sols et des changements climatiques sur les ressources en eau du bassin versant du Haut-Bandama le long de la route Korhogo-Badikaha. En effet, sur la période 2021-2050, les modèles climatiques régionaux étudiés montrent une baisse des débits à l'exutoire du bassin versant de 11,27 % selon le scénario RCP4.5 et une réduction des débits de 16,75 % en moyenne sur la période 2021-2050 selon le scénario RCP8.5.

De plus, l'analyse des prélèvements actuels dans les retenues Lokpoho et Morrison a montré des besoins en eau s'élevant à plus de 3 256 969 m³ et 18 110 996 m³ respectivement. Les prélèvements prévus sur la période 2021-2050 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 dans le barrage de Lokpoho et de Morrison montrent une augmentation de la demande en eau future. L'analyse du fonctionnement des réservoirs en réponse à l'évolution mensuelle des besoins en eau a révélé une insatisfaction de la demande en eau pendant trois mois, de janvier à mars pour la retenue de Lokpoho et de février à avril pour la retenue de Morrison sur la période 1986-2016. L'augmentation de la demande en eau sur la période 2021-2050 induit de longues périodes de non-satisfaction, allant de 4 à 6 mois selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Ces niveaux de satisfaction montrent qu' sur la période 2021-2050, le complexe sucrier de Ferkessédougou pourrait être confronté à des déficits hydriques sur plusieurs mois, selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Cette étude à travers les résultats obtenus, permet de comprendre le fonctionnement hydro-climatologique et de connaître les paramètres extrêmes climatiques impactant la production agricole. Par conséquent, elle permet d'orienter les activités de production de la canne à sucre dans le complexe sucrier de Ferkessédougou.

Mots-clés : Modélisation, Changement climatique, Canne à sucre, ressource en eau, Ferkessédougou, Côte d'Ivoire.

Abstract

The various anthropogenic and climatic pressures, especially the rapid population increase, have led to increased stress on agricultural water resources, resulting in insufficient agricultural production. This is the case for SUCAF-CI, in northern Côte d'Ivoire, which is unable to meet its share of the national sugar demand, estimated at around 120,000 tons per year. The objective of this study is to analyze the relationship between climate variability, land use dynamics, and hydrological response over time and space in the Haut-Bandama watershed to optimize sugarcane production in the Ferkessédougou sugar complexes. Approaches based on characterizing climate change, land use dynamics, and modeling water flows in the Haut-Bandama watershed have shown, through the application of first- and second-order Markov chains, an increasingly frequent recurrence of two- and three-year droughts by 2050. The climate models used indicate a decrease in precipitation followed by a reduction in flows of 16.74% by 2050, with the exception of the RCA4 model, which predicts an increase in rainfall followed by a 6.05% increase in flows.

Regarding land use dynamics, the analysis revealed a trend toward soil exposure due to the degradation of vegetation cover, which leads to an increase in the runoff coefficient, rising from 31% to 36% in 2020 and 2050, respectively.

Hydrological modeling using the SWAT model highlighted the impact of land use dynamics and climate change on water resources in the Haut-Bandama watershed along the Korhogo-Badikaha route. Indeed, by 2050, the regional climate models studied show a decrease in watershed outflow by 11.27% under the RCP4.5 scenario and a reduction in outflow of 16.75% on average by 2050 under the RCP8.5 scenario.

Additionally, the analysis of current withdrawals from the Lokpoho and Morrison reservoirs showed water needs of over 3,256,969 m³ and 18,110,996 m³, respectively. Withdrawals projected for 2050 under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the Lokpoho and Morrison dams show an increase in future water demand. The analysis of reservoir performance in response to the monthly evolution of water needs revealed unmet water demand for three months, from January to March for the Lokpoho reservoir and from February to April for the Morrison reservoir, over the period 1986-2016. The increase in water demand by 2050 leads to extended periods of unmet demand, ranging from 4 to 6 months under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. These satisfaction levels indicate that by 2050, the Ferkessédougou sugar complex could face water deficits over several months, according to the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. This study, through the results obtained, provides an understanding of hydro-climatological functioning and identifies the extreme climatic parameters impacting agricultural production. Consequently, it guides sugarcane production activities in the Ferkessédougou sugar complex.

Keywords : Modeling, Climate change, Sugarcane, Water resources, Ferkessédougou, Côte d'Ivoire