



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2020-2021

N° D'ORDRE : 0436/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0416008490

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THÈME :

**IMPACT DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION
DU SOL SUR LA REPONSE HYDROLOGIQUE DE
LA RIVIERE BOA A SOROTONA
(NORD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

KONAN Guillaume Pinson

JURY

Président : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Directeur : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Encadreur : M. SORO Tanina Drissa, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Examineur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Soutenu publiquement
le : 08 Octobre 2021



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2020-2021

N° D'ORDRE : 0436/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0416008490

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THÈME :

**IMPACT DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION
DU SOL SUR LA REPOSE HYDROLOGIQUE DE
LA RIVIERE BOA A SOROTONA
(NORD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

KONAN Guillaume Pinson

JURY

Président : M. DIBI Brou, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Directeur : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences,
Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Encadreur : M. SORO Tanina Drissa, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Examineur : M. ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUÉDÉ

Soutenu publiquement

le : 08 Octobre 2021

DEDICACES

Je dédie ce mémoire

A

Mon père KONAN Ahoussou Lambert, pour son soutien moral, matériel et financier durant tout mon cursus scolaire et universitaire.

Ma mère AMANI Adjoua Madeleine Épouse KONAN pour son soutien moral et surtout spirituel.

Mes frères et sœurs pour leurs conseils.

A tous ceux qui ne cessent de me soutenir de près, comme de loin.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à Dieu Tout Puissant, pour la force, le courage et surtout la miséricorde qu'il m'a procuré tout au long de mon parcours. Sans lui, le présent travail n'aurait pas pu être mené à terme.

J'exprime également ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de cette formation universitaire ainsi qu'à la réalisation de ce mémoire.

Ainsi, je tiens à remercier :

Professeur TIDOU Abiba Sanogo Épouse KONE, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) d'avoir accepté mon inscription en Master de Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE) et pour la formation de qualité dont j'ai bénéficié.

Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur de l'UFR Environnement pour la bonne gestion de l'UFR et pour sa détermination à garantir un encadrement de qualité aux étudiants de cette UFR.

Docteur KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences, Chef du Département des Sciences de la Terre et par ailleurs, Directeur scientifique de ce mémoire, pour son appui et l'intérêt qu'il a apporté à cette recherche.

Docteur SORO Tanina Drissa, Maître-Assistant, pour ses conseils, critiques, remarques et son sens du travail bien fait qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers toutes ces personnes qui ont participé à l'amélioration de ce travail. Il s'agit de :

Docteur DIBI Brou, Maître de conférences, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE), qui a accepté de présider le jury de ce mémoire de master en dépit de ces multiples occupations.

Docteur ANOH Kouao Armand, Maître-Assistant, qui a accepté d'instruire et de prendre part au jury de ce mémoire en tant qu'examineur. Je vous remercie Docteur pour votre disponibilité et vos critiques pertinentes.

Je réitère ma gratitude à tous les enseignants de l'UFR Environnement qui ont contribué à ma formation.

Mes remerciements vont également à l'endroit des membres du LSTE, pour leur aimable accueil et leur disponibilité. Je remercie plus particulièrement le Doctorant KONATE Yaya, qui n'a pas hésité à partager son expérience et ses précieux conseils dans ce travail.

Grand merci à tous mes amis en Master de GEE, pour leur soutien. Je n'oublie pas AKPI Epokou Axel-Régis pour son aide dans la rédaction de ce mémoire.

A ma tutrice, maman KOUAKOU Affoué, merci infiniment pour le soutien depuis mon arrivée chez toi. Que Dieu te le rende au centuple pour tout ce que tu as fait pour moi.

A mes proches et à ma famille, qui ont toujours manifesté leur infaillible soutien et encouragement. Merci infiniment.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	3
1.1. Présentation de la zone d'étude	3
1.1.1. Situation géographique	3
1.1.2. Caractéristiques morphométriques du bassin versant	3
1.1.3. Climat.....	4
1.1.4. Réseau hydrographique.....	5
1.1.5. Végétation	5
1.1.6. Relief.....	6
1.1.7. Géologie.....	6
1.1.8. Population et activités socio-économiques	7
1.2. Généralités sur l'occupation du sol et la modélisation.....	7
1.2.1. Notions sur l'occupation du sol	7
1.2.1.1. Définition de l'occupation du sol.....	7
1.2.1.2. Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol.....	8
1.2.1.3. Télédétection dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol.....	8
1.2.2. Notions sur la modélisation	9
1.2.2.1. Modélisation hydrologique	9
1.2.2.2. Bilan hydrologique d'un bassin versant	9
1.2.2.3. Modèle hydrologique GR2M	9
Conclusion partielle	10
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	12
2.1. Matériel.....	12
2.1.1. Données.....	12
2.1.1.1. Données hydroclimatiques	12
2.1.1.2. Données images.....	12
2.1.2. Outils utilisés	13
2.2. Méthodes	13

2.2.1. Caractérisation de la variabilité hydroclimatique du bassin versant de la rivière Boa à Sorotona	13
2.2.1.1. Indice standardisé de précipitations (SPI)	13
2.2.1.2. Indice de Sécheresse des Débits (SDI).....	14
2.2.1.3. Intensité des séquences de sécheresse	15
2.2.1.4. Durée des séquences de sécheresse	15
2.2.2. Caractérisation de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Boa.....	15
2.2.2.1. Prétraitement des images.....	16
2.2.2.2. Traitement des images.....	17
2.2.2.3. Evaluation et validation de la classification.....	17
2.2.2.4. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol.....	18
2.2.3. Modélisation du comportement hydrologique du bassin versant de la rivière Boa	18
2.2.3.1. Choix du modèle hydrologique	18
2.2.3.2. Préparation des données d'entrée et de sortie du modèle GR2M.....	18
2.2.3.3. Calage et validation du modèle	19
Conclusion partielle	20
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	21
3.1. Résultats.....	21
3.1.1. Caractérisation de la variabilité hydroclimatique du bassin versant de la rivière Boa	21
3.1.1.1. Indice standardisé de précipitations (SPI)	21
3.1.1.2. Indice de sécheresse de débits (SDI).....	22
3.1.2. Caractérisation de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Boa.....	24
3.1.2.1. Evaluation de la classification supervisée des images	24
3.1.2.2. Etats de l'occupation du sol de 1985 à 2020	25
3.1.2.3. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol de 1985 à 2020	28
3.1.3. Modélisation du comportement hydrologique du bassin versant de la rivière Boa	32
3.1.3.1. Résultats du calage et validations du modèle GR2M.....	32
3.1.3.2. Simulation des écoulements sur le bassin versant de la Boa de 1981 à 2016 ..	34
3.1.3.3. Analyse des paramètres du bilan hydrologique.....	34
3.2. Discussion.....	36
Conclusion partielle	38
CONCLUSION	39
REFERENCES	41

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

DH	:	Direction de l'Hydrologie
ETM	:	Enhanced Thematic Mapper
GEE	:	Génie de l'Eau et de l'Environnement
GIEC	:	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GR2M	:	Génie Rural à 2 paramètres au pas Mensuel
INS	:	Institut National de la Statistique
LSTE	:	Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement
MNT	:	Modèle Numérique de Terrain
OMM	:	Organisation Mondiale de la Météorologie
SDI	:	Indice de Sécheresse de Débits
SPI	:	Indice Standardisé de Précipitations
UFR	:	Unité de Formation et de Recherche
UJLoG	:	Université Jean Lorougnon Guédé
USGS	:	United States Geological Survey

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques morphométriques du bassin versant	4
Tableau II : Caractéristiques des images Landsat utilisées	12
Tableau III : Classification de la sécheresse selon SPI (OMM, 2012)	14
Tableau IV : Définition des états de sécheresse hydrologique à l'aide du SDI (Nalbantis & Tsakiris, 2009)	14
Tableau V : Intensité des séquences de sécheresse météorologique	22
Tableau VI : Durée des séquences de sécheresse météorologique.....	22
Tableau VII : Intensité des séquences de sécheresse hydrologique.....	23
Tableau VIII : Durée des séquences de sécheresse hydrologique	23
Tableau IX : Matrice de confusion de la classification de l'image de 1985	24
Tableau X : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2003	25
Tableau XI : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2020	25
Tableau XII : Taux de conversion des surfaces entre les différentes périodes .	29
Tableau XIII : Résultats du calage et validations du modèle GR2M	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du bassin versant de la rivière Boa à Sorotona	3
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de Borotou-Koro sur la période 2000-2020.....	4
Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Boa	5
Figure 4 : Carte du relief du bassin versant de la Boa.....	6
Figure 5 : Carte géologique du bassin versant de la Boa	7
Figure 6 : Schéma conceptuel du modèle GR2M (Mouelhi <i>et al.</i> , 2006) .	10
Figure 7 : Organigramme de la méthodologie d'étude de la dynamique de l'occupation du sol	16
Figure 8 : Evolution de l'indice standardisé de précipitations (SPI) à la station de Borotou-Koro sur la période 1981-2020.....	21
Figure 9 : Evolution de l'indice standardisé de précipitations (SPI) à la station de Beyla sur la période 1981-2016	21
Figure 10 : Evolution de l'indice de sécheresse de débits (SDI) à la station de Sorotona sur la période 1981-2016.....	23
Figure 11 : Carte d'occupation du sol du bassin versant en 1985.....	26
Figure 12 : Carte d'occupation du sol du bassin versant en 2003.....	27
Figure 13 : Carte d'occupation du sol du bassin versant en 2020.....	28
Figure 14 : Evolution des surfaces des classes d'occupation du sol du bassin versant entre 1985 et 2003	30
Figure 15 : Evolution des surfaces des classes d'occupation du sol du bassin versant entre 2003 et 2020	31
Figure 16 : Evolution des surfaces des classes d'occupation du sol du bassin versant entre 1985 et 2020	31
Figure 17 : Hydrogrammes observés et simulés à la station de Sorotona : calage (1994-1999).....	32
Figure 18 : Hydrogrammes observés et simulés à la station de Sorotona : validation (A=2000-2010 ; B=2011-2016 ; C=2000-2016)	33
Figure 19 : Débits cumulés observés et calculés pour la période 1981-2016 à la station de Sorotona	34
Figure 20 : Bilan hydrologique annuelle du bassin versant de la Boa sur la période 1981-2016.....	35

INTRODUCTION

Lors de la conférence initiée par l'ONU sur « l'Environnement humain » à Stockholm en 1972, la communauté scientifique pointait déjà l'urgence d'une prise de conscience des enjeux environnementaux liés au changement climatique et à la dynamique de l'occupation du sol, résultant de l'activité humaine, du rôle des couverts végétaux et des sols. En effet, les changements climatiques ont pour effets, la réduction de la production agricole avec son corolaire de détérioration de la sécurité alimentaire, l'incidence accrue des inondations et de la sécheresse, la propagation des maladies et l'augmentation des risques de conflits dus à la raréfaction des terres et de l'eau (GIEC, 2007). Même si l'Afrique n'est pas la plus responsable de ces changements climatiques, elle n'en demeure pas moins la plus vulnérable. En effet, plusieurs travaux réalisés en Afrique et particulièrement en Côte d'Ivoire ont mis en exergue la corrélation entre le climat, la végétation et l'hydrologie. Ainsi, dans ses travaux de synthèse, Brou (2005) fait remarquer qu'il existe une étroite corrélation entre la dynamique de la modification du couvert végétal et la baisse pluviométrique. Kouadio (2011) souligne que le comportement hydrologique des bassins est influencé à la fois par la variabilité des paramètres hydroclimatiques et aussi par la dynamique de l'occupation du sol. Dès lors, les changements d'occupation et d'utilisation des sols sont à la base de modification constante de l'interaction terre-atmosphère et du comportement hydrologique des bassins versants.

Le bassin versant de la rivière Boa n'est pas en marge de ces modifications physiques. En effet, les eaux de la rivière Boa sont exploitées par SUCRIVOIRE qui est une entreprise agro-industrielle située au Nord-ouest de la Côte d'Ivoire pour l'irrigation, la fabrication du sucre de canne et les besoins domestiques. Or, à l'instar des grandes industries agro-alimentaires ivoiriennes, les besoins en eau pour l'irrigation et les populations de la région augmentent progressivement et les ressources en eau sont de plus en plus sollicitées. Cependant, les études de Servat *et al.* (1997) effectuées en Côte d'Ivoire sur les tendances pluviométriques ont mis en évidence une baisse généralisée des précipitations dans les zones savaniques, forestières et même côtières. Cette baisse des précipitations a entraîné également celle des écoulements. En effet, selon Yao (2019), le débit de la rivière Boa qui était important, connaît une baisse au fil des années. Quels sont les effets de ces différents changements environnementaux sur la réponse hydrologique du bassin versant ?

C'est dans cette perspective que s'inscrit cette étude intitulée : « **Impact de la dynamique de l'occupation du sol sur la réponse hydrologique de la rivière Boa à Sorotona (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire)** ». L'objectif général de cette étude est d'évaluer l'impact de la dynamique de l'occupation du sol sur la réponse hydrologique du bassin versant de la rivière Boa. Plus spécifiquement, l'étude vise à :

INTRODUCTION

- caractériser la variabilité hydroclimatique du bassin versant de la rivière Boa;
- caractériser la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Boa;
- modéliser le comportement hydrologique du bassin versant de la rivière Boa à l'aide du modèle GR2M.

Le mémoire s'articule autour de trois parties :

- la première partie concerne les généralités sur la zone d'étude et la définition de quelques notions du thème;
- la deuxième partie présente le matériel et les méthodes utilisés pour mener cette étude;
- la troisième partie présente les résultats et leur discussion.

Une conclusion comportant des perspectives d'étude clôture ce mémoire.

PREMIERE PARTIE :
GENERALITES

1.1. Présentation de la zone d'étude

1.1.1. Situation géographique

Le Sassandra est l'un des principaux fleuves de la Côte d'Ivoire. Il prend sa source en Guinée, pays frontalier au Nord-ouest et se jette dans la mer au niveau de la ville de Sassandra. La zone d'étude est un sous-bassin du fleuve Sassandra qui prend sa source en Guinée dans la préfecture de Beyla et coule jusqu'à son exutoire à Sorotona dans la région du Bafing en Côte d'Ivoire. Le bassin versant de la Boa est situé entre les longitudes 6°53' et 8°45' Ouest et les latitudes 8°08' et 8°43' Nord et couvre une superficie de 18 581 km² (Figure 1).

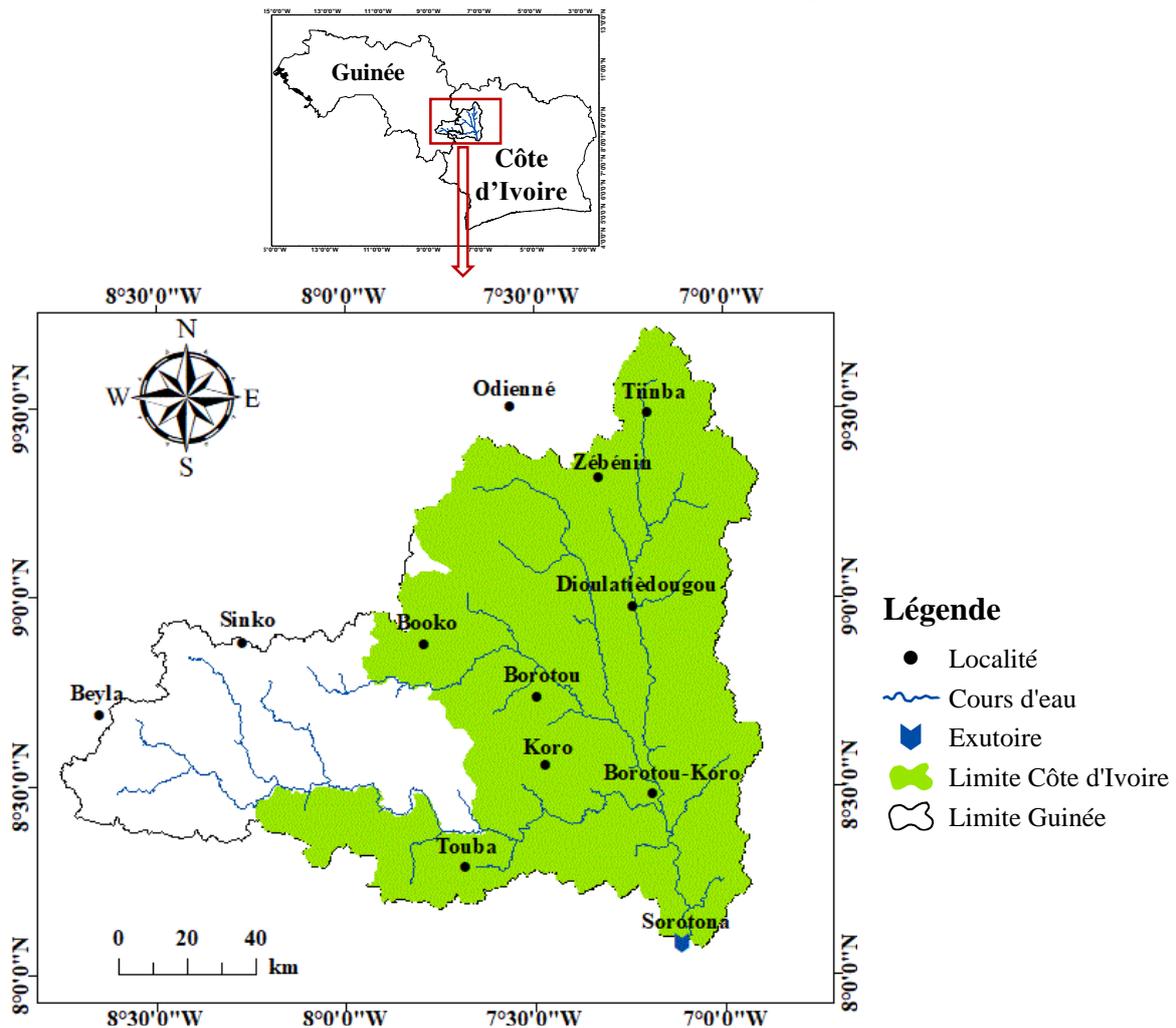


Figure 1 : Localisation du bassin versant de la rivière Boa à Sorotona

1.1.2. Caractéristiques morphométriques du bassin versant

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de la rivière Boa à Sorotona sont résumées dans le tableau I.

Tableau I : Caractéristiques morphométriques du bassin versant

Caractéristiques	Valeurs
Superficie (km ²)	18 581
Périmètre (km)	916
Indice de compacité (Kc)	1,8
Longueur du rectangle équivalent (km)	390,6
Largeur du rectangle équivalent (km)	47,6
Altitude minimale (m)	255
Altitude maximale (m)	1 260
Pente longitudinale (m/km)	2,86

1.1.3. Climat

Le bassin versant de la Boa est sous l'influence du régime tropical de transition (Yao, 2019). La température moyenne interannuelle est de 26,7°C et ce régime pluviométrique se caractérise par deux grandes saisons (Figure 2) :

- une saison pluvieuse d'Avril à Octobre avec des précipitations moyennes mensuelles oscillant entre 103 et 261 mm sur la période 2000-2020 ;
- une saison sèche de Novembre à Mars avec des pluies moyennes variant de 10 à 28 mm sur la période 2000-2020.

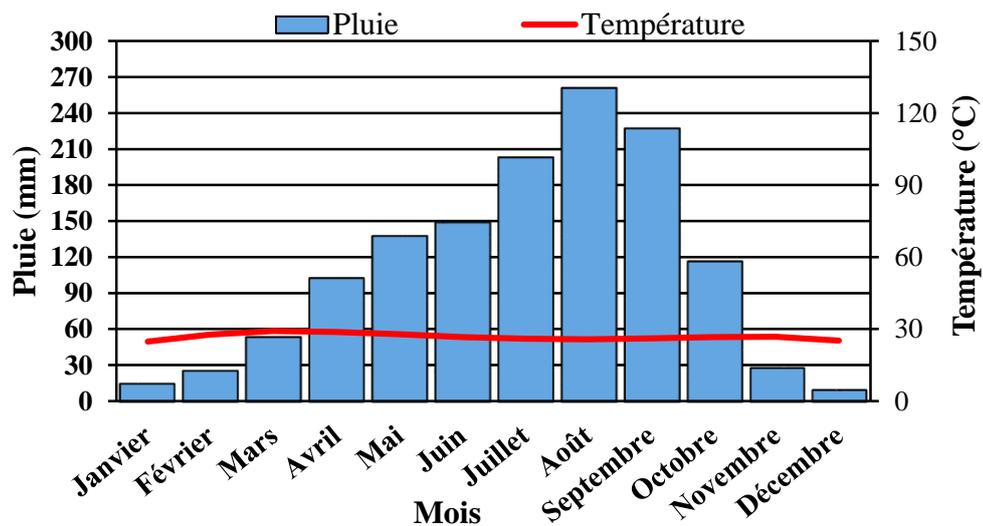


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de Borotou-Koro sur la période 2000-2020

1.1.4. Réseau hydrographique

Le bassin versant de la Boa prend sa source en Guinée dans la préfecture de Beyla à une altitude de 685 m. Il s'écoule d'abord d'Ouest en Est en décrivant un arc de cercle autour de Booko. Ensuite il prend une direction Nord-sud où son cours présente de nombreux méandres. Le bassin versant est drainé par plusieurs rivières qui sont les principaux affluents du fleuve Sassandra dans sa partie amont. Ces rivières sont représentées sur la figure 3. Il s'agit de :

- la rivière Boa qui a pour principal affluent le Niamé et le Sien ;
- la rivière Férédougouba (ou Bagbè) ;
- la rivière Tiemba qui reçoit le Sangoua sur sa rive gauche et le Gouari sur sa rive droite.

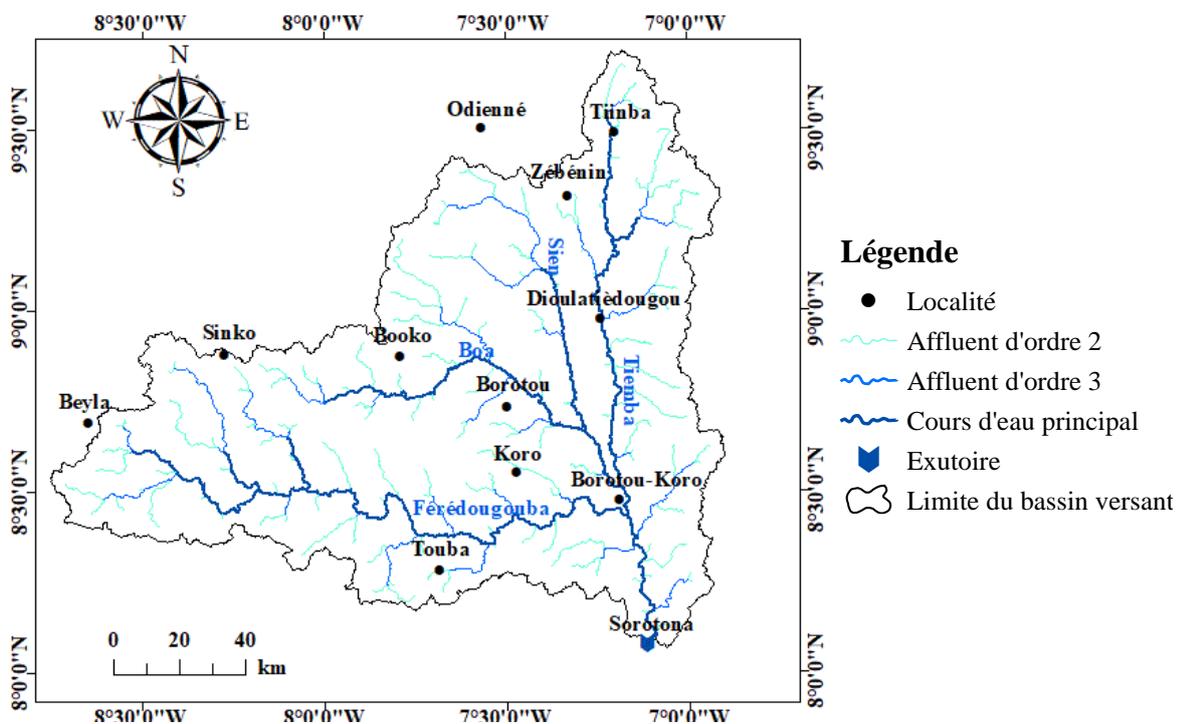


Figure 3 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Boa

1.1.5. Végétation

Selon Yao (2019), la zone du bassin versant se situe entre deux types de végétations : la zone forestière et la zone de savane. Ce milieu de transition, dit secteur sub-soudanais est un mélange de forêts et de savanes. Les abords des cours d'eau et des bas-fonds sont souvent bordés de forêts galeries. Vers le sud et à l'ouest, se dresse une forêt dense et humide (la forêt ombrophile du domaine guinéen).

1.1.6. Relief

Le relief de la zone étude montre des d'altitude variant de 255 m à 1 260 m (Figure 4). On peut voir apparaître quelques rares reliefs sous forme de buttes et de collines (sud de la zone) ou de dômes de faible importance. Le relief est essentiellement constitué de plateaux et de collines. Il est dominé par les derniers contreforts de la dorsale guinéenne, composé de hauts plateaux, de vallées de montagnes, avec des sommets pouvant atteindre 700 à 1 000 m d'altitude (Yao, 2019).

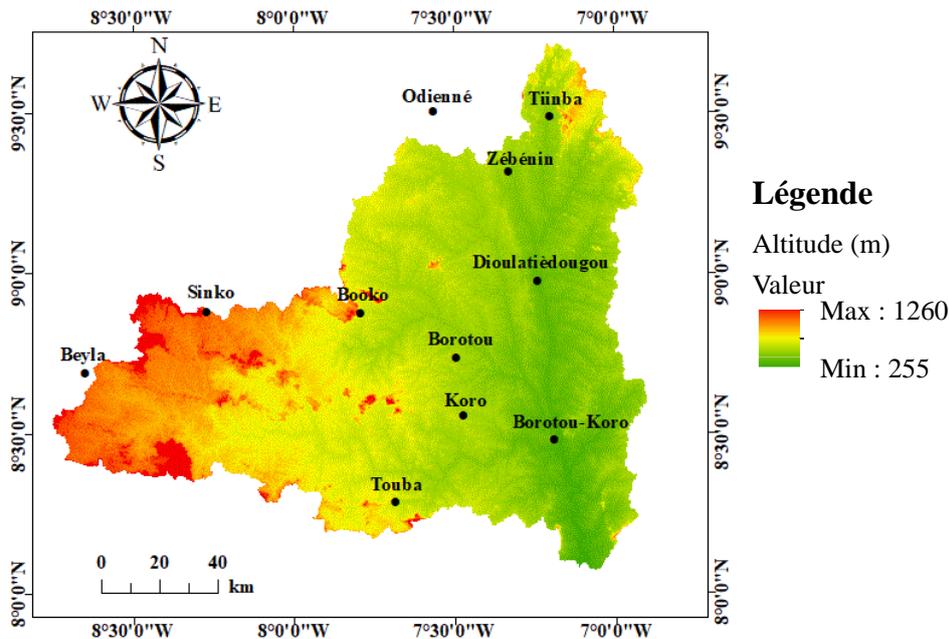


Figure 4 : Carte du relief du bassin versant de la Boa

1.1.7. Géologie

Le substratum géologique de la zone d'étude selon Tagini (1971) est constitué de plusieurs formations à savoir (Figure 5) :

- une bande de gneiss orientée nord-sud. Au sein de ces formations apparaissent, les migmatites et granites libériens constitués de granites à hypersthène : norites et charnockites ;
- une couche de granitoïdes hétérogènes à biotite : granites monzonitiques, granodiorites. Ces granitoïdes couvrent plus de la moitié de la zone ;
- une couche de dolérites en dykes ou filons qui se sont injectées dans les deux précédentes formations. Ces dolérites constituent l'ossature des grands reliefs ;
- une bande récente et actuelle de roches métamorphiques.

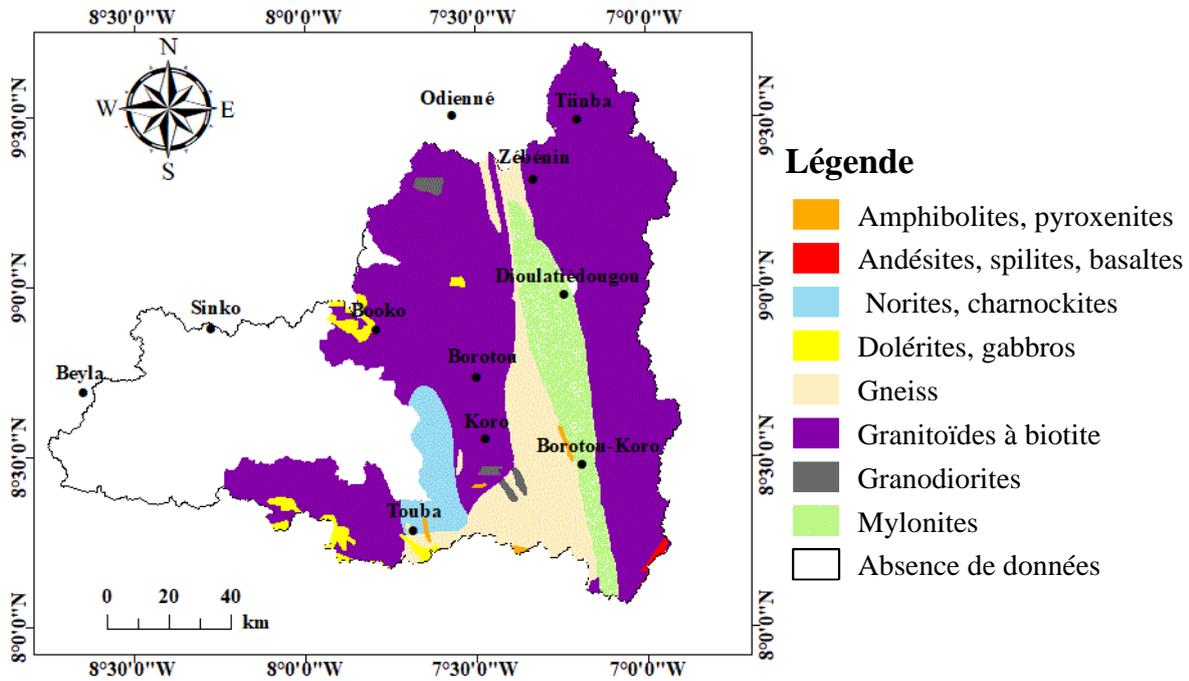


Figure 5 : Carte géologique du bassin versant de la Boa

1.1.8. Population et activités socio-économiques

En 2014, le bassin versant comptait près de 66 947 habitants (INS, 2015) du côté de la Côte d'Ivoire. Les populations rurales du bassin versant sont composées de Mahouka, Kla, Dan, Gbéka, Finan (groupe des autochtones) et de Sénoufo, Yacouba, Baoulé, Koyaka, Odienneka (groupe des allogènes). Elles pratiquent essentiellement l'agriculture et l'élevage. Les cultures rencontrées dans la zone sont les cultures vivrières (riz pluvial, riz irrigué, maïs, manioc, l'igname) et les cultures pérennes de rente (cane à sucre, anacarde, coton, cacao).

1.2. Généralités sur l'occupation du sol et la modélisation

1.2.1. Notions sur l'occupation du sol

1.2.1.1. Définition de l'occupation du sol

Le concept d'occupation des sols fait référence non seulement à la surface du sol mais aussi au sous-sol. Il peut se définir suivant trois sémantiques (Brown & Duh, 2004). L'occupation du sol se définit premièrement comme une observation physique à un instant donné de la surface terrestre, incluant la végétation (naturelle ou artificielle) et les constructions humaines.

Deuxièmement, l'occupation du sol fait référence à un état biophysique d'un endroit précis ou à un espace homogène du paysage (par exemple une parcelle agricole) (Brown & Duh, 2004). Troisièmement, l'occupation du sol peut être définie suivant des classes. La définition des classes concernant l'occupation du sol est basée sur l'état du couvert végétal à un instant

précis sur une portion d'un espace géographique. Les classes «végétation», « bâti », « eau », etc. par exemple peuvent être des caractéristiques de l'occupation d'un territoire donné.

1.2.1.2. Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol

La cartographie de la dynamique de l'occupation du sol nécessite plusieurs types de données dépendant des échelles (spatiale et temporelle) de réalisation d'une part, et de l'objectif visé par l'étude d'autre part. Parmi les données, les images satellitaires restent indispensables, vu qu'elles répondent aux préoccupations spatiales et temporelles. Les images sont disponibles à plusieurs dates et à des pas de temps différents (journalier, mensuel et annuel). Si l'objectif de l'étude est de détecter les changements survenus aux différents pas de temps, l'une des considérations temporelles les plus importantes pour cette détection, est le mois d'acquisition des images (Malika *et al.*, 1997). Jensen (1983) a rapporté que les images satellitaires prises pendant les périodes ensoleillées présentent un très bon contraste. Cette préférence des images permet de résoudre les problèmes des angles solaires, les changements de la végétation et les différences dans l'humidité des sols. Toutes ces considérations tiennent compte du fait que les activités humaines sur un espace respectent un calendrier qui est le plus souvent lié aux contraintes hydroclimatiques. Pour cette étude, les images Landsat sont adaptées pour leur disponibilité et leur haute résolution spatiale. Une telle image pourrait permettre d'avoir des renseignements sur des parcelles de moins de 0,5 hectare, sachant que le pixel d'une image Landsat est de 0,09 ha (30 m x 30 m). L'échelle d'espace est continentale, régionale ou locale. Le choix des images est aussi fonction de la taille de l'objet à cartographier.

1.2.1.3. Télédétection dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol

La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour l'acquisition d'informations sur un objet sans qu'il y ait un contact matériel entre l'instrument d'acquisition et l'objet de l'étude. Les technologies d'observation de la terre jouent un rôle majeur dans l'étude, la modélisation et le suivi des phénomènes environnementaux, à des échelles spatiales et temporelles variables (Begni *et al.*, 2005). La télédétection constitue une information spatialisée de base pour l'étude des changements d'occupation des sols. En effet, le suivi des changements d'occupation et d'usage des sols est depuis plusieurs décennies généralement effectué à partir de données de télédétection (Hubert-Moy *et al.*, 2001 ; Turner *et al.*, 2007). En outre, les images à haute résolution de type Landsat TM, SPOT ou radar permettent d'analyser et de réaliser des cartographies spatio-temporelles des changements observés par télédétection (Corgne, 2014).

1.2.2. Notions sur la modélisation

1.2.2.1. Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique constitue l'un des outils les plus utilisés pour répondre aux enjeux associés à la simulation et à la prévision des variables hydrologiques. La modélisation hydrologique est aussi utilisée en complément à l'observation et à l'expérimentation afin de parfaire ou de peaufiner la connaissance de l'état du bassin versant et des processus hydrologiques qui ont lieu. Le choix du modèle hydrologique se fait généralement en fonction des objectifs spécifiques de simulation, des données disponibles pour répondre à ces objectifs et des capacités numériques disponibles. En hydrologie opérationnelle, une fois le modèle calé et validé en fonction des observations, la représentation des processus ou de la géométrie pourra évoluer et être affinée en fonction des nouvelles données disponibles (Hingray *et al.*, 2009).

1.2.2.2. Bilan hydrologique d'un bassin versant

Un bassin versant est une section d'un cours d'eau, défini comme une surface drainée par ce cours et ses affluents en amont de la section (Merrien-Soukatchoff, 2008). Tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit traverser l'extrémité de la section considérée, appelée exutoire, pour poursuivre son trajet vers l'aval. Le bilan hydrologique permet de connaître les apports et les pertes en eau du bassin et donc de quantifier de façon globale les ressources en eau. En effet, il traduit de manière quantifiable le cycle de l'eau au niveau d'une région ou d'un bassin versant (Yao, 2015). Ce bilan se détermine à partir de l'équation générale du bilan hydrologique suivante (Équation 1) :

$$P = Q + ETR + I + \Delta S \quad \text{(Équation 1)}$$

avec :

P : Précipitation (mm) ;

Q : Lamme d'eau ruisselée (mm) ;

ETR : Evapotranspiration réelle (mm) ;

I : Lamme d'eau infiltrée (mm) ;

ΔS : Variations des stocks ($\Delta S = 0$ à l'échelle du cycle hydrologique).

1.2.2.3. Modèle hydrologique GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres au pas Mensuel) est un modèle conceptuel pluie-débit comportant deux réservoirs régulés par deux paramètres ajustables (Mouelhi, 2003). Ce modèle a été mis en place par le Cemagref (Lavabre *et al.*, 1993 ; Makhlouf & Michel, 1994). Il a connu plusieurs versions proposées successivement par Kabouya (1990),

Kabouya & Michel (1991), Makhoulf & Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006) qui ont permis d'améliorer progressivement sa performance. La structure du modèle, bien qu'empirique, l'apparente à un modèle conceptuel à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. La version utilisée dans cette étude est celle de Mouelhi *et al.* (2006). Le modèle GR2M est constitué (Figure 6) :

- d'un réservoir de production ou réservoir « sol » régissant la fonction de production de capacité maximale X_1 , correspondant à la capacité maximale de rétention en eau du sol ;
- d'un réservoir « eau gravitaire » ou réservoir de routage régissant la fonction de transfert caractérisée par un coefficient d'échange souterrain X_2 .

Les deux paramètres libres à caler dans ce modèle sont donc X_1 et X_2 . Dans son principe de fonctionnement, une fraction de la pluie mensuelle reçue par le bassin participe à l'écoulement direct. Le niveau du réservoir qui représente le stock d'eau évolue en fonction de la fraction de pluie restante. L'évapotranspiration potentielle (ETP) quant à elle, évolue par l'intermédiaire d'une évapotranspiration réelle (ETR). La vidange progressive de ce stock d'eau produit l'écoulement retardé (ou lent).

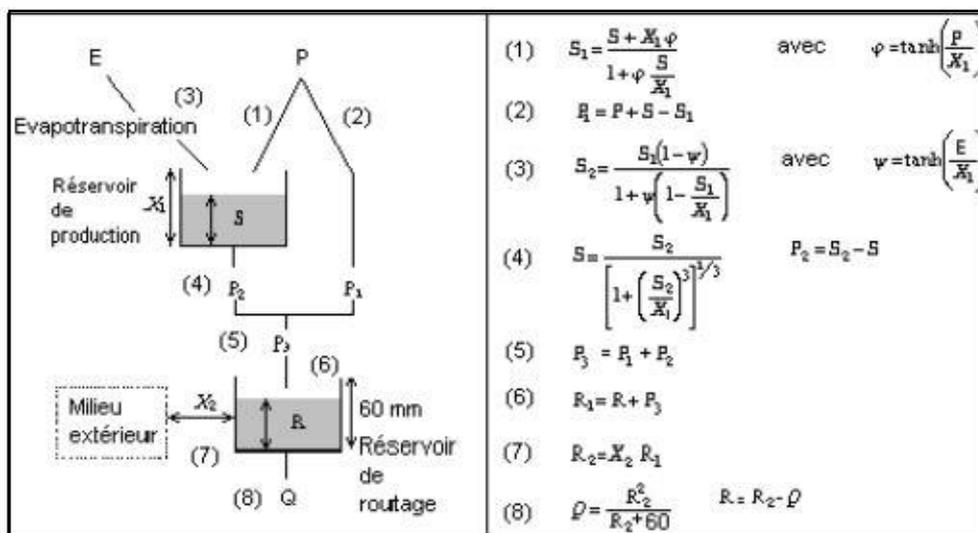


Figure 6 : Schéma conceptuel du modèle GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006)

Conclusion partielle

La généralité a permis d'abord de localiser et de décrire la zone d'étude. Ainsi, le bassin versant de la Boa est un sous bassin du bassin versant de la Sassandra à cheval entre la Guinée et la Côte d'Ivoire. Avec un régime climatique de type tropical de transition, le bassin versant de la Boa à une végétation qui se situe entre deux types de végétations : une zone forestière et une

zone de savane. L'altitude minimale est de 255 m. Le bassin versant de la Boa appartient majoritairement au permien. Il a une pluviométrie et une température moyenne annuelle respective de 1 295,8 mm et 26,7°C à la station synoptique de Borotou-Koro pour la période 2000-2020. Ensuite, elle a permis de définir et donner quelques notions l'occupation du sol et la modélisation.

Dans la deuxième partie, il s'agit de présenter le matériel et les méthodes utilisés pour élaborer notre travail.

DEUXIEME PARTIE :
MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériel

Le matériel requis pour la réalisation de cette étude se compose de données et de logiciels.

2.1.1. Données

Les données utilisées dans cette étude sont les données hydroclimatiques, et les données images

2.1.1.1. Données hydroclimatiques

Les données climatologiques sont issues de SUCRIVOIRE. Elles comprennent la pluie et la température au pas de temps mensuel. Elles s'étendent sur la période 1981-2020 pour la station de Borotou-Koro (Côte d'Ivoire) et sur la période 1981-2016 pour celle de Beyla (Guinée). Les données hydrométriques (débits) sont celles de la station de Sorotona en Côte d'Ivoire. Elles sont issues de la Direction de l'Hydrologie (DH) du Ministère de l'Hydraulique. Elles ont servi à étudier le comportement hydrologique du bassin versant. Ces données sont au pas de temps mensuel et s'étendent de 1981 à 2016.

2.1.1.2. Données images

Les données images sont composées d'images satellitaires et du modèle numérique de terrain (MNT) provenant du site de téléchargement de l'USGS (www.earthexplorer.gov). Le MNT de la zone d'étude a permis d'extraire le bassin versant avec la station de Sorotona comme exutoire, le réseau hydrographique et à concevoir la carte du relief. Les images satellitaires proviennent des capteurs TM, ETM et OLI de Landsat. Elles ont permis la réalisation des cartes d'occupation du sol. Cette étude a nécessité trois différentes scènes (198-053, 198-054 et 199-054) pour couvrir tout le bassin versant de la rivière Boa. Le tableau II récapitule les caractéristiques des images Landsat utilisées.

Tableau II : Caractéristiques des images Landsat utilisées

Capteur	Résolution spatiale	Nombre de bandes	Path/Row	Date d'acquisition	Source
TM	30 m	7	198-053	20-01-1985	USGS
			199-054		
			198-054	12-02-1985	
ETM	30 m	8	198-053	30-01-2003	
			198-054		
			199-054	05-01-2003	
OLI	30 m	11	199-054	12-01-2020	
			198-053	06-02-2020	
			198-054		

2.1.2. Outils utilisés

Au cours de cette étude, plusieurs outils ont été utilisés. Il s'agit de :

- **ArcGIS 10.4.1** pour la délimitation du bassin versant ;
- **Excel 2013** pour les traitements statistiques des données de pluie, de température et de débits ;
- **DrinC** pour la génération des indices standardisés de précipitations (SPI) et des indices de sécheresse des débits (SDI) ;
- **Envi 4.7** pour le traitement des images satellitaires ;
- **Modèle GR2M** pour la modélisation pluie-débit.

2.2. Méthodes

2.2.1. Caractérisation de la variabilité hydroclimatique du bassin versant de la rivière Boa à Sorotona

2.2.1.1. Indice standardisé de précipitations (SPI)

L'indice standardisé de précipitations est un indicateur statistique qui permet d'apprécier ou de caractériser l'ampleur des aléas hydroclimatiques dans une série de données (Mckee *et al.*, 1993). Le SPI est recommandé par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) pour étudier la sécheresse météorologique locale ou régionale (Vidal & Wade, 2009 ; OMM, 2012). Le SPI a été appliqué par de nombreux auteurs sur diverses régions du globe (Giddings *et al.*, 2005 ; Wu *et al.*, 2005 ; Roudier & Mahé, 2010 ; Bodian, 2014 ; Faye *et al.*, 2015). Il est obtenu à partir de la formule de l'équation 2 suivante :

$$SPI = \frac{P - P_m}{\sigma} \quad \text{(Équation 2)}$$

avec :

P : Précipitation totale du mois ou de l'année considéré(e) (mm) ;

P_m : Précipitation moyenne historique de la période (mm) ;

σ : Écart-type historique des précipitations de la période (mm).

L'indice SPI calculé est interprété suivant la classification adoptée par l'Organisation Mondiale de la Météorologie. Sept classes de sécheresse sont distinguées, variant d'extrêmement sèche à extrêmement humide (Tableau III).

Tableau III: Classification de la sécheresse selon SPI (OMM, 2012)

Valeurs de l'indice SPI	Catégorie de sécheresse
2,0 et plus	Extrêmement humide
1,50 à 1,99	Très humide
1,0 à 1,49	Humide
-0,99 à 0,99	Normale
-1,0 à -1,49	Modérément sèche
-1,50 à -1,99	Sévèrement sèche
-2,0 et moins	Extrêmement sèche

2.2.1.2. Indice de Sécheresse des Débits (SDI)

L'indice de sécheresse des débits (SDI) est utilisé pour déterminer la réaction du fleuve face au déficit pluviométrique (Nalbantis & Tsakiris, 2009). Il permet de déterminer les déficits et variations du débit (Mahé & Olivry, 1995). Il est calculé selon l'équation 3 suivante :

$$SDI = \left(\frac{Di}{Dm} \right) - 1 \quad \text{(Équation 3)}$$

avec :

Di : Débit du mois ou de l'année i (m^3/s) ;

Dm : Débit moyen de la série sur l'échelle temporelle considérée (m^3/s).

Selon Nalbantis & Tsakiris (2009), les états (classes) de sécheresse hydrologique sont définis pour le SDI de manière identique à ceux utilisés dans les indices de sécheresse météorologique tels que le SPI. Cinq états sont considérés et sont désignés par un nombre entier allant de 0 (non sécheresse) à 4 (sécheresse extrême) et sont définis par les critères du tableau IV.

Tableau IV : Définition des états de sécheresse hydrologique à l'aide du SDI
(Nalbantis & Tsakiris, 2009)

État	Description	Critère
0	Non sécheresse	$SDI \geq 0$
1	Légère sécheresse	$-1,0 \leq SDI < 0$
2	Sécheresse modérée	$-1,5 \leq SDI < -1$
3	Sécheresse sévère	$-2,0 \leq SDI < -1,5$
4	Sécheresse extrême	$SDI < -2$

2.2.1.3. Intensité des séquences de sécheresse

L'intensité de la sécheresse peut être définie comme étant l'ampleur et la gravité des conséquences du déficit de précipitations. Elle est évaluée à l'aide des valeurs du SPI et du SDI. Une sécheresse sévit lorsque le SPI ou le SDI est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou en dessous et se termine lorsque le SPI ou le SDI devient positif (Soro *et al.*, 2014). On effectue la classification de la sécheresse suivant les valeurs des tableaux III et IV.

2.2.1.4. Durée des séquences de sécheresse

La durée des séquences de sécheresse est l'une des caractéristiques importantes de la sécheresse. En effet, si une sécheresse débute rapidement sous certains régimes climatiques, il faut généralement au moins deux à trois mois avant de s'installer dans d'autres régions. Elle peut ensuite persister pendant des mois et même des années (Soro *et al.*, 2014). Le calcul de la durée de sécheresse se fait comme suit (Équation 4) :

$$d = (A_{fin} - A_{début}) + 1 \quad \text{(Équation 4)}$$

avec :

A_{fin} : Année de la fin de la période sèche ;

$A_{début}$: Année du début de la période sèche.

2.2.2. Caractérisation de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Boa.

L'étude de la dynamique de l'occupation du sol se fait nécessairement par l'acquisition et le traitement des images satellitaires. Le modèle conceptuel de la réalisation des cartes d'occupation du sol est représenté à la figure 7.

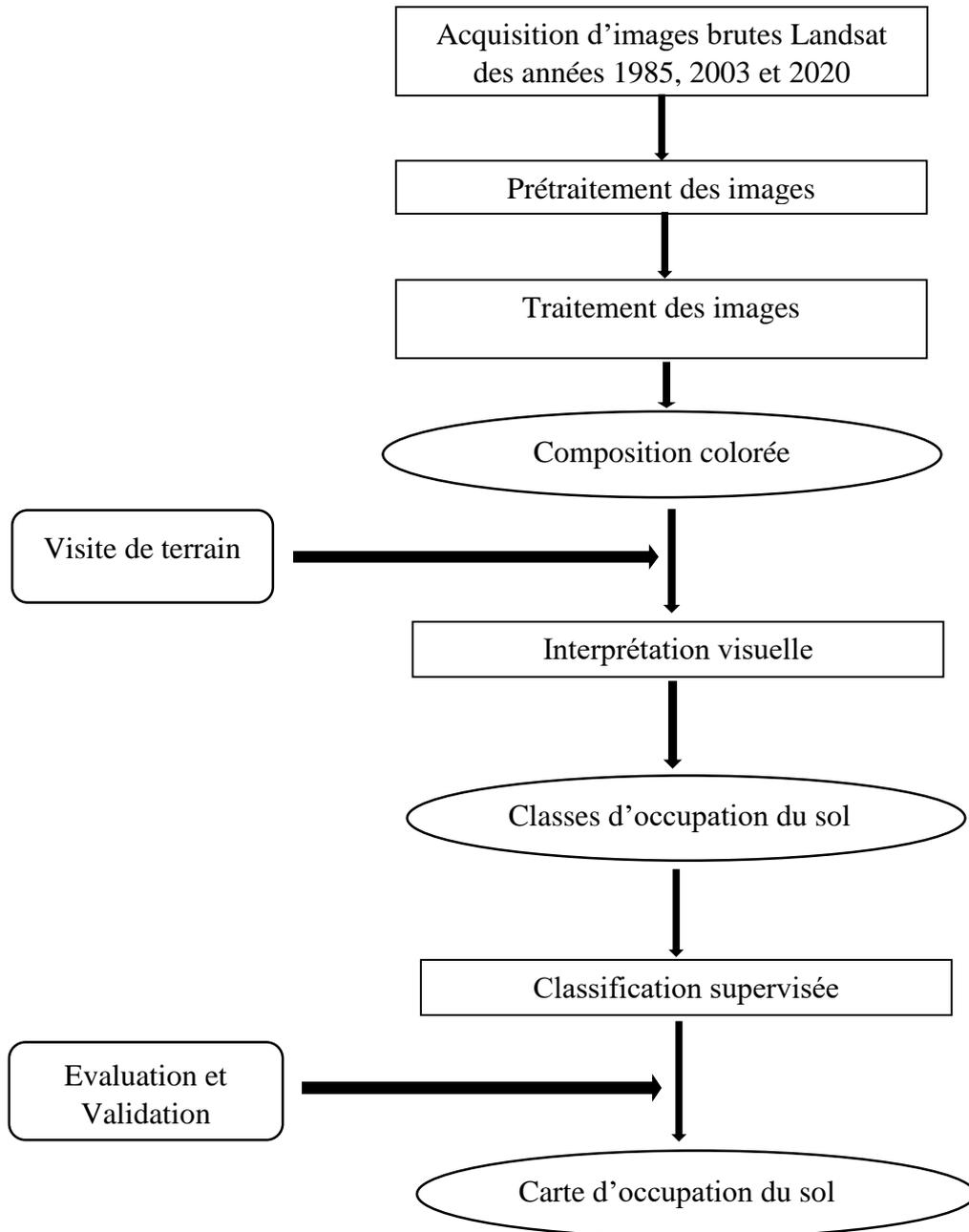


Figure 7 : Organigramme de la méthodologie d'étude de la dynamique de l'occupation du sol

2.2.2.1. Prétraitement des images

Le prétraitement a permis de réaliser le mosaïquage, qui consiste à assembler les trois scènes images pour couvrir notre zone d'étude. L'assemblage permet d'empiler les bandes pour avoir une seule image multi-bande. Cela facilite la manipulation des images.

Les images satellitaires utilisées ne contenant pas de distorsions et de nuages, leurs traitement n'a pas nécessité de corrections géométrique et atmosphérique.

2.2.2.2. Traitement des images

Le traitement des images se fait en deux principales étapes. Il s'agit d'abord de faire une composition colorée des images satellitaires pour discriminer au mieux les différentes classes d'occupation du sol et ensuite faire la classification des images pour définir les classes d'occupations du sol.

➤ Composition colorée

La composition colorée consiste à afficher simultanément à l'écran trois bandes de l'image dans les canaux de base Rouge, Vert et Bleu. Elle permet d'avoir une meilleure visibilité et facilite l'extraction des informations. Cette opération permet l'interprétation sur la base de la connaissance du comportement spectral des différents types d'occupation du sol. Après avoir effectué plusieurs combinaisons de vrai et fausses couleurs des compositions colorées, la combinaison retenue est la composition colorée infrarouge fausse couleur 4-3-2 (Infrarouge-Rouge-Vert). Cette combinaison a été utilisée dans ce travail parce qu'elle présente la meilleure discrimination des types d'occupation du sol.

➤ Classification des images

La classification est une des activités majeures en télédétection. Elle a pour but de réaliser une représentation de la situation sur le terrain. Elle utilise des paramètres de diagnostic bien définis. Elle classe les pixels ou les objets issus de la segmentation de l'image dans une catégorie donnée d'objets (Coulibaly, 2009). Le résultat d'une classification est une nouvelle image dont chaque pixel est identifié par une catégorie particulière d'objets. Il existe deux types de classification : la classification supervisée et la classification non supervisée. L'occupation spatiale de la zone d'étude étant connue, c'est la classification supervisée qui a été appliquée avec l'algorithme du maximum de vraisemblance.

2.2.2.3. Evaluation et validation de la classification

Les matrices de confusion sont utilisées pour valider les classifications réalisées. Les précisions globales (P) et les coefficients de Kappa (K) permettent de vérifier la qualité de l'apprentissage et donnent une estimation de la validité des classifications. Selon Landis & Koch (1977), le coefficient de Kappa est excellent quand il est compris entre 0,81-1; bon lorsqu'il est compris entre 0,61- 0,80; et modéré entre 0,21-0,60. Les résultats des précisions globales et des coefficients de Kappa sont donnés par le logiciel Envi 4.7. La matrice de confusion se présente comme suit:

- les lignes représentent l'affectation des pixels à chaque thème après classification,
- les colonnes indiquent la répartition réelle des pixels dans chaque thème,

- et la diagonale représente les pourcentages des pixels bien classés.

2.2.2.4. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol

La dynamique de l'occupation du sol est appréciée par les variations spatio-temporelles des superficies des classes d'occupation du sol entre 1985 et 2020. L'analyse diachronique des images couvrant le bassin versant a permis de mieux apprécier la dynamique de l'occupation du sol. Les taux de transformation des différentes classes d'occupation du sol sont ainsi donnés par la formule suivante (Kouadio, 2011) (Équation 5) :

$$T = \left(1 - \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{\frac{1}{n}}\right) \times 100 \quad \text{Équation (5)}$$

avec :

T : Taux de conversion (%) ;

S_1 : Superficie du thème à la date 1 (km²) ;

S_2 : Superficie du thème à la date 2 (km²) ;

n : Nombre d'années entre les deux dates.

2.2.3. Modélisation du comportement hydrologique du bassin versant de la rivière Boa

2.2.3.1. Choix du modèle hydrologique

Le modèle GR2M à deux paramètres dans sa nouvelle version modifiée et conceptualisée a été retenu pour modéliser le comportement hydrologique du bassin versant de la Boa. Cette version utilisée a déjà montré sa performance et sa robustesse sur plusieurs bassins versants ivoiriens (Kouassi *et al.*, 2011 ; Yao, 2015).

2.2.3.2. Préparation des données d'entrée et de sortie du modèle GR2M

❖ Données d'entrée

Les données d'entrée du modèle GR2M sont les précipitations moyennes mensuelles du bassin versant, l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle et les débits convertis en lame d'eau.

❖ Données de sortie

Les données de sortie sont les débits calculés, exprimés également en millimètre en phase de calage et de validation.

2.2.3.3. Calage et validation du modèle

Une fois la phase de préparation des données terminée, il s'en suit alors le calage et la validation du modèle. Le but de cette étape consiste à s'assurer que le modèle hydrologique reproduit le plus adéquatement possible les débits observés. Le calage consiste de ce fait à ajuster les paramètres du modèle de façon à ce que l'adéquation entre les débits simulés et observés soit maximale. Le critère le plus utilisé est celui de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970). Ce critère adimensionnel permet de juger de la qualité de l'ajustement et de faciliter la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements ont des ordres de grandeur différents. Les paramètres du modèle retenus sont ceux dont la valeur minimise la fonction critère préalablement choisie. Celle-ci est souvent égale à la somme des carrés des erreurs entre débit observé et débit simulé sur la période de calage (Équation 6).

$$Nash = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs.i} - Q_{sim.i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs.i} - Q_{obs})^2} \right] \quad (\text{Équation 6})$$

avec :

$Q_{obs.i}$: Débits observés et calculés au pas de temps i ;

$Q_{sim.i}$: Débits calculés au pas de temps i ;

Q_{obs} : Moyenne des débits observés sur la période considérée.

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

La performance du modèle peut être jugée selon les valeurs prises par le critère de Nash (Perrin, 2000).

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

Conclusion partielle

Les données de l'étude sont de deux types. Ils se composent en données hydroclimatiques et en données images. Les premières comprennent les données météorologiques et hydrométriques. Les données météorologiques ont été acquises sur les périodes 1981-2020 et période 1981-2016. Les données de débits issues de la station hydrométrique de Sorotona sont acceptables et assez complète sur la période 1981-2016. Cette période est donc retenue pour la simulation du comportement hydrologique du bassin versant. Les dernières données regroupent le modèle numérique de terrain (MNT) et les images satellitaires Landsat (TM, ETM et OLI). Elles concourent toutes à la mise en évidence de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant de la Boa. Plusieurs outils ont été utilisés pour l'exploitation des différentes données. Diverses méthodes ont été élaborées pour l'utilisation des différentes données à partir des outils définis. Deux méthodes statistiques de caractérisation des régimes hydroclimatiques (indice standardisé de précipitations (SPI), indice de sécheresse de débits (SDI) ont été utilisées. Ces méthodes ont permis de caractériser la variabilité climatique et hydrologique du bassin versant. La méthode de classification supervisée des images satellitaires a été retenue pour l'établissement des cartes de l'occupation du sol du bassin versant de la Boa. Le modèle hydrologique GR2M a été utilisé pour mettre en évidence le comportement hydrologique du bassin versant étudié. Les résultats de ces méthodes utilisées sont analysés et discutés dans la troisième partie.

TROISIEME PARTIE :
RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Caractérisation de la variabilité hydroclimatique du bassin versant de la rivière Boa

3.1.1.1. Indice standardisé de précipitations (SPI)

Le bassin versant de la rivière Boa à Borotou-Koro a connu une variabilité climatique marquée par une alternance d'années humides et sèches au regard de l'évolution des indices SPI (Figure 8). Les années sèches sont représentées par les valeurs négatives de l'indice SPI et les années humides par les valeurs positives. Les valeurs de SPI calculées traduisent avec plus de précision les périodes de déficit et d'excédent des précipitations. Durant la période 1981-2020, la station de Borotou-Koro en Côte d'Ivoire a enregistré plus d'années de séquences humides que sèches (22 sur 40). La station a été marquée par de longues années de sécheresse de 1981 à 1982 ; 1986 à 1987 ; 1989 à 1992 et de 2013 à 2014.

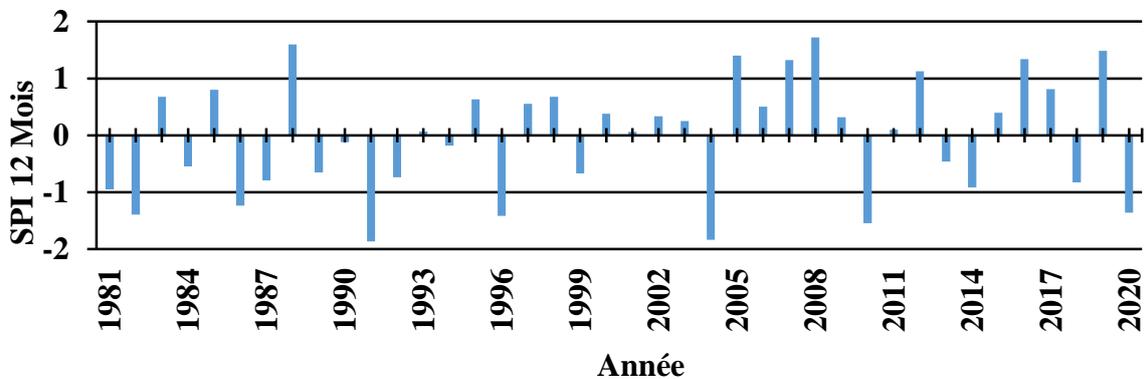


Figure 8 : Evolution de l'indice standardisé de précipitations (SPI) à la station de Borotou-Koro sur la période 1981-2020

La station de Beyla en Guinée (Figure 9) a enregistré aussi plus d'années en séquences humides que sèches (21 sur 36) sur la période 1981-2016. Notons que la station de Beyla a connu de longues années sèches de 3 à 4 ans pour les années 1985 à 1988 ; 1990 à 1992 et 2007 à 2009.

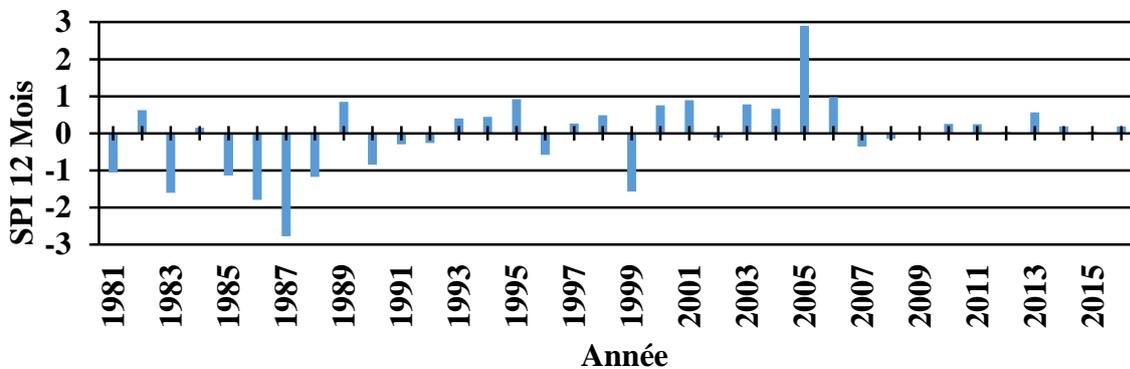


Figure 9 : Evolution de l'indice standardisé de précipitations (SPI) à la station de Beyla sur la période 1981-2016

➤ **Intensité des séquences de sécheresse météorologique**

Sur la période d'étude 1981-2020, les sécheresses les plus remarquables de par leur intensité à la station de Borotou-Koro ont été celles des années 1991 et 2004. Quant à la station de Beyla, les sécheresses les plus remarquables de 1981 à 2016 ont été celles des années 1986 et 1987. Les épisodes secs détectés ont été qualifiés de sévèrement sec et d'extrêmement sec (Tableau V).

Tableau V : Intensité des séquences de sécheresse météorologique

Station Paramètre	Borotou-Koro		Beyla	
	Intensité	-1,87	-1,84	-1,79
Type de sécheresse	sévérement sèche		sévérement sèche	extrêmement sèche
Date d'occurrence	1991	2004	1986	1987

➤ **Durée des séquences de sécheresse météorologique**

L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre que la station de Borotou-Koro a connu sa plus longue période de sécheresse de 1989 à 1992 et celle de Beyla de 1985 à 1988 (Tableau VI).

Tableau VI : Durée des séquences de sécheresse météorologique

Station Paramètre	Borotou-Koro	Beyla
	Durée maximale (Années)	4
Période	1989-1992	1985-1988

3.1.1.2. Indice de sécheresse de débits (SDI)

L'évolution des débits moyens annuels à travers l'indice SDI sur la période 1981-2016 permet de montrer la grande variabilité de l'écoulement dans le bassin versant (Figure 10). Cette figure montre le déficit des écoulements (sécheresse) dès 1981 avec une persistance à partir de 1986 pour s'étendre jusqu'en 2004. Un retour à la normale des écoulements est constaté à partir de 2005 jusqu'en 2016. L'année 1987 est celle qui a connu l'indice de sécheresse le plus élevé avec une valeur de -2,27. Cet épisode sec a été qualifié de sécheresse extrême.

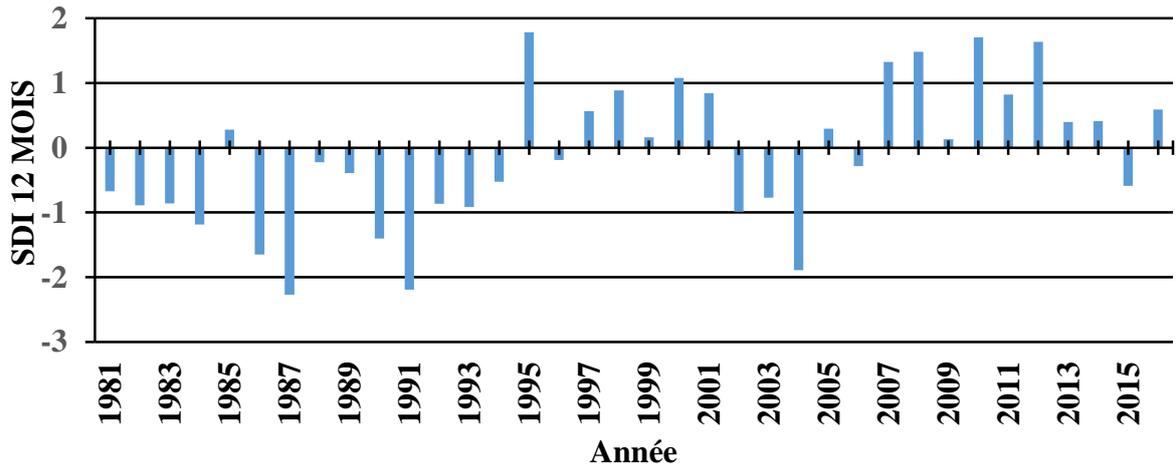


Figure 10 : Evolution de l'indice de sécheresse de débits (SDI) à la station de Sorotona sur la période 1981-2016

➤ **Intensité des séquences de sécheresse hydrologique**

L'analyse de l'intensité des séquences de sécheresse hydrologique indique que la station de Sorotona a enregistré des sécheresses remarquables de par leurs fortes intensités. Les épisodes secs détectés ont été qualifiés de sécheresse extrême et sécheresse sévère pour les années respectives 1987, 1991 et 2004 (Tableau VII).

Tableau VII : Intensité des séquences de sécheresse hydrologique

Station Paramètre	Sorotona		
	Intensité	-2,27	-2,19
Type de sécheresse	sécheresse extrême		sécheresse sévère
Date d'occurrence	1987	1991	2004

➤ **Durée des séquences de sécheresse hydrologique**

Le résultat de l'analyse de la durée des séquences de sécheresse hydrologique est consigné dans le tableau VIII. Il montre que la station de Sorotona a connu une très longue période de sécheresse allant de 1986 à 1994.

Tableau VIII : Durée des séquences de sécheresse hydrologique

Station Paramètre	Sorotona
Durée maximale (Années)	9
Période	1986-1994

3.1.2. Caractérisation de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant de la rivière Boa

3.1.2.1. Evaluation de la classification supervisée des images

La classification des images a permis de caractériser six principales classes d'occupation du sol. Il s'agit de l'eau, de la zone humide, de la forêt, de la savane, des sols nus et des cultures. Ces différentes classifications ont été évaluées par les matrices de confusion représentées par les tableaux IX, X et XI. Le calcul du coefficient de Kappa effectué sur les images de 1985, 2003 et 2020 a donné des valeurs respectives de 94,27%, 90,75% et 96,52%.

Il ressort de l'analyse du tableau VII, qu'il y a confusion entre les surfaces occupées par l'eau et la zone humide à 7,08%. La zone humide est confondue à 10,88% à l'eau. Les autres classes étant bien discriminées, les confusions sont très négligeables.

Tableau IX : Matrice de confusion de la classification de l'image de 1985

Classes	Eau	Zone humide	Forêt	Savane	Sols nus	Cultures
Eau	79,59	7,08	0	1,46	0	0
Zone humide	10,88	92,70	0	0,33	0	0
Forêt	4,54	0,22	97,34	2,01	0	0,33
Savane	3,85	0	2,29	92,79	1,01	2,97
Sols nus	0	0	0	0,65	98,99	0
Cultures	1,13	0	0,37	2,76	0	96,70
Total	100	100	100	100	100	100
Coefficient de Kappa=0,94						

L'analyse du tableau X, indique qu'il y a confusion entre les surfaces occupées par l'eau et la zone humide à 19,75%. La zone humide est confondue à 7,62% à la savane et la savane et les cultures sont confondues à 6,55%.

Tableau X : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2003

Classes	Eau	Zone humide	Forêt	Savane	Sols nus	Cultures
Eau	87,50	19,75	0	0,38	0	0
Zone humide	11,36	78,05	0	7,62	0	0
Forêt	0	0	99,86	2,01	0	0
Savane	1,14	2,19	0	83,11	0,33	6,55
Sols nus	0	0	0	2,52	99,67	0,76
Cultures	0	0	0,14	6,25	0	92,69
Total	100	100	100	100	100	100
Coefficient de Kappa=0,90						

L'analyse du tableau XI fait ressortir la bonne discrimination des classes de l'image 2020. La confusion principale s'observe dans les moindres mesures entre la classe sols nus et la classe cultures qui est de 6,32%.

Tableau XI : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2020

Classes	Eau	Zone humide	Forêt	Savane	Sols nus	Cultures
Eau	95,92	2,44	0	0	0	0
Zone humide	2,97	95,86	0	0,77	0	0
Forêt	0	0	100	0,15	0	0,07
Savane	1,11	1,70	0	97,68	0	0,93
Sols nus	0	0	0	1,39	99,18	6,32
Cultures	0	0	0	0	0,82	92,68
Total	100	100	100	100	100	100
Coefficient de Kappa=0,96						

3.1.2.2. Etats de l'occupation du sol de 1985 à 2020

La carte d'occupation du sol générée à partir de l'image de 1985 (Figure 11) montre une dominance de la savane qui couvre 60,14% du bassin versant suivie de la forêt avec 13,59%. La zone humide et l'eau occupent respectivement 8,56% et 6,23% de la zone. Enfin, les sols nus et les cultures couvrent respectivement 6,16% et 5,32% de la superficie du bassin versant.

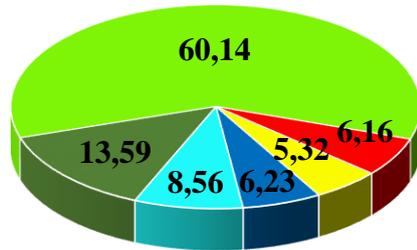
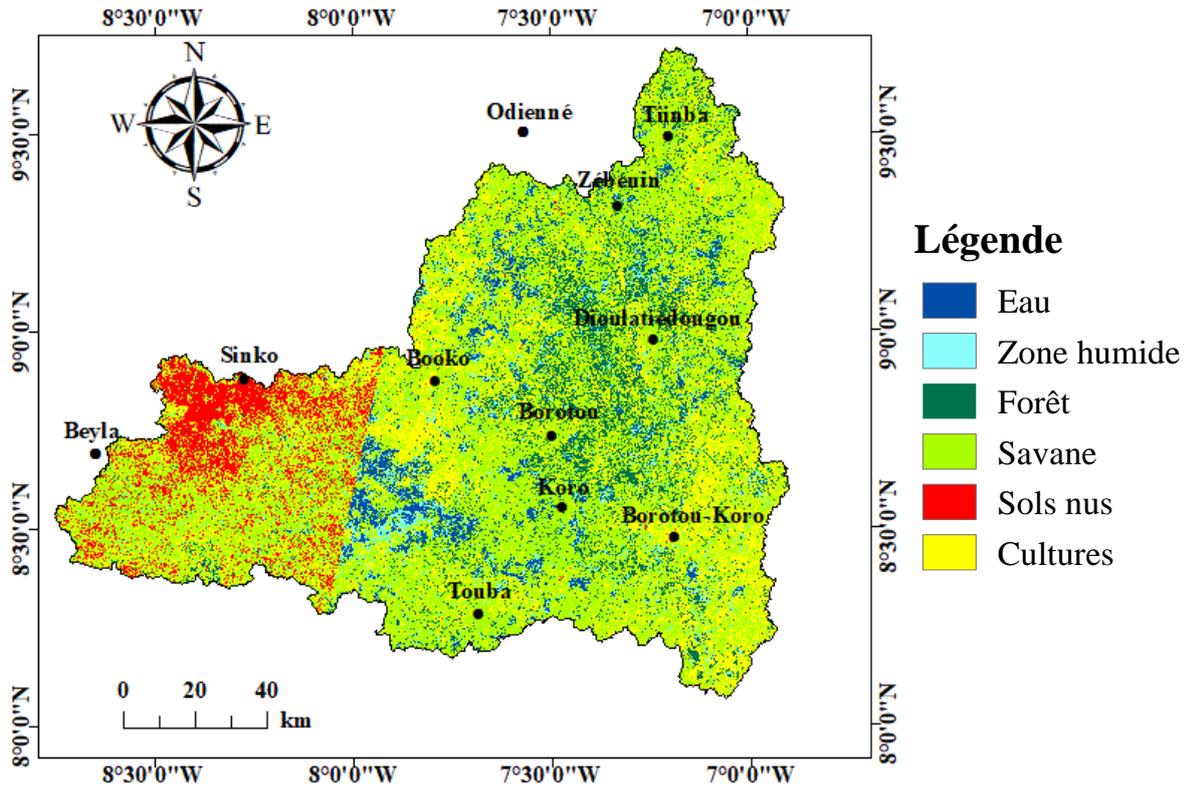


Figure 11 : Carte d'occupation du sol du bassin versant en 1985

En 2003, l'analyse de la carte d'occupation du sol du bassin versant montre une remarquable évolution des surfaces des classes cultures et sols nus par rapport à celles de 1985. Par contre, la superficie des classes eau, zone humide, savane et forêt a diminué. On peut ainsi constater à la figure 12 que :

- les cultures couvrent dans leur ensemble une superficie de 16,22% de la zone ;
- la forêt occupe quant à elle 9,28% du bassin versant ;
- les sols nus s'étalent sur 9,31% de la superficie de la zone ;
- la savane couvre 53,89% de la superficie ;
- l'eau et la zone humide occupent respectivement 4,21% et 7,09% du bassin versant.

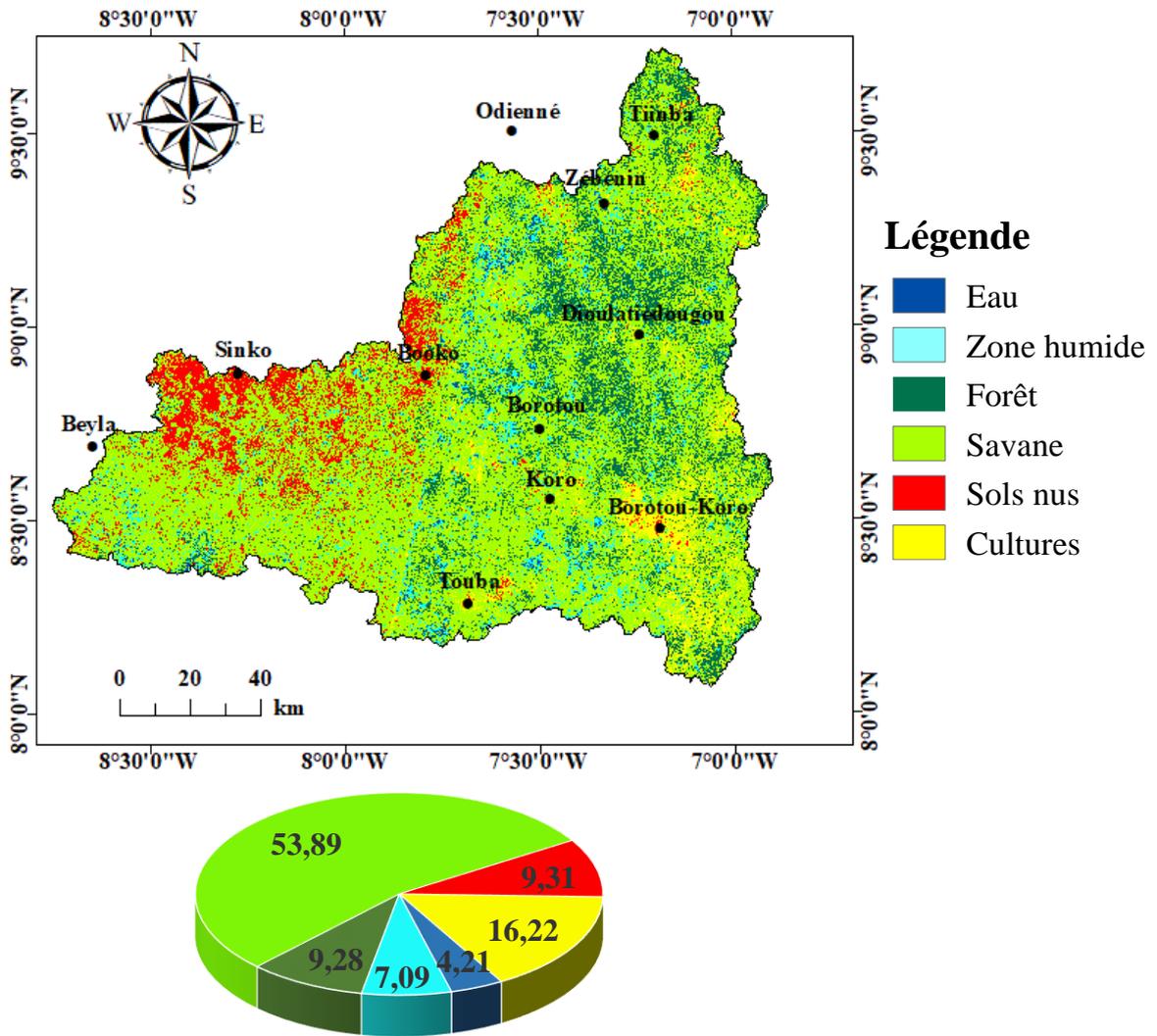


Figure 12 : Carte d'occupation du sol du bassin versant en 2003

L'analyse de la carte d'occupation du sol du bassin versant de l'année 2020 (figure 13) montre que la forêt connaît toujours une diminution de sa superficie avec 3,57 % de la superficie totale. La savane et les cultures prédominent avec respectivement 37,25% et 35,60% de la superficie du bassin versant. Ensuite, viennent les sols nus qui occupent 18,05% de la zone. L'eutrophisation des cours d'eau affecte au fil des années l'espace couvert par l'eau et la zone humide du bassin versant avec 2,42 % pour le premier et 3,11% pour le second.

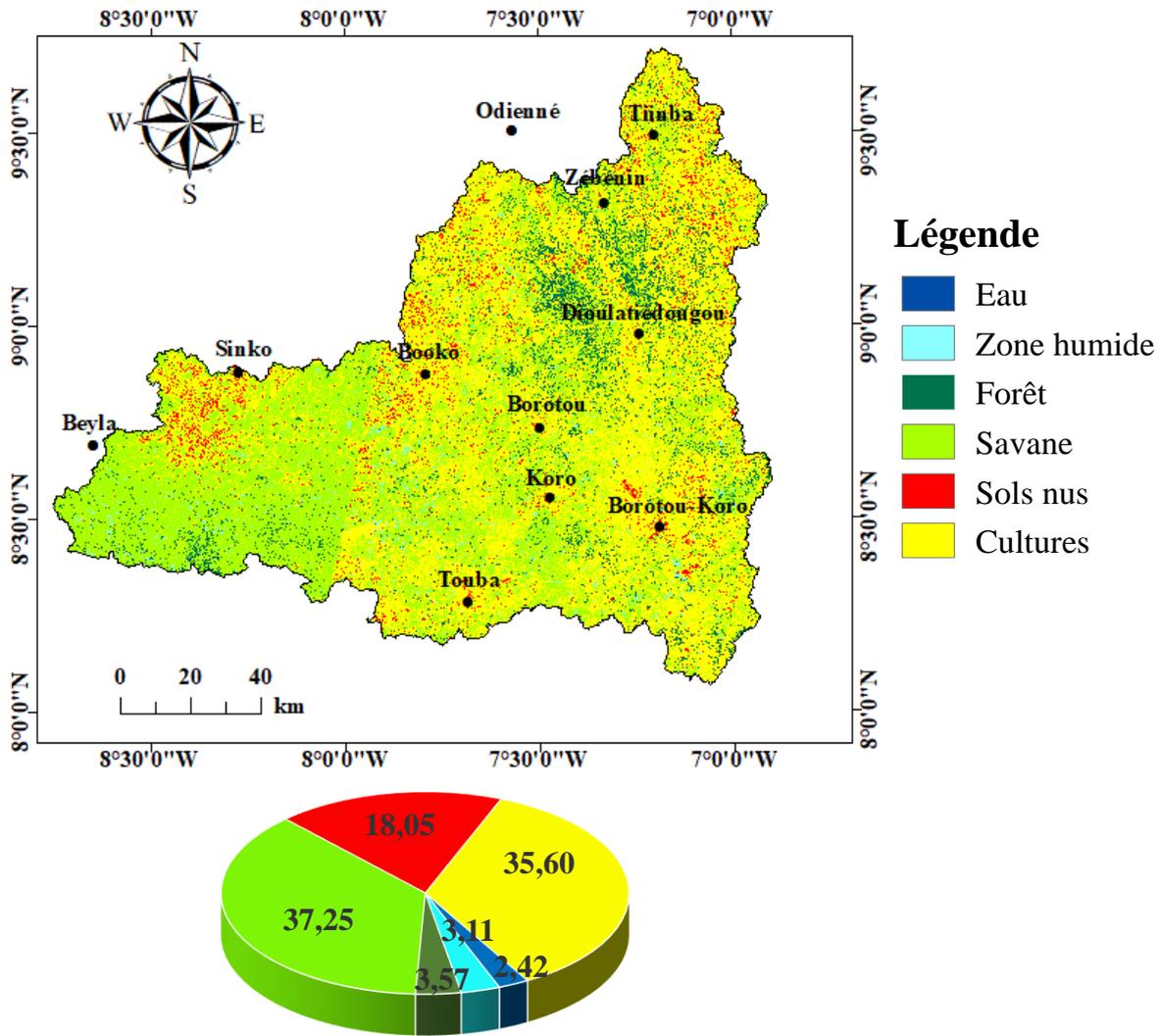


Figure 13 : Carte d'occupation du sol du bassin versant en 2020

3.1.2.3. Evaluation de la dynamique de l'occupation du sol de 1985 à 2020

L'analyse de la dynamique de l'occupation du sol entre 1985 et 2003 montre une évolution au niveau des différentes unités. Les changements majeurs intervenus au cours de cette période concernent pour la plupart la forêt et la savane dont les superficies ont été colonisées par les cultures et les sols nus. Le tableau XII montre que sur cette période (1985-2003), environ 1 962,15 km² de superficies de forêt et de savane ont été converties en zones agricoles. Il s'agit d'une dynamique classique, d'autant plus que pour étendre leurs surfaces agricoles, les populations rurales ont tendance à défricher les espaces naturels. Les cultures ont aussi subi une augmentation considérable de 2 025 km² soit un taux de conversion de 6,01 %. L'analyse du tableau XII montre une importante couverture en sols nus avec plus de 1 144,5 km² de superficies due à la dégradation des espaces naturels et la conversion des zones agricoles.

A l'opposé, on constate une importante régression des superficies couvertes par l'eau et la zone humide. L'étendue de cette régression est estimée à 648,48 km². Cette régression des zones humides et des cours d'eau est la conséquence de la dégradation du couvert végétal, du déficit pluviométrique constatée sur la zone et de certaines pratiques agricoles.

Sur la période 2003-2020, les cultures qui couvrent plus du tiers du bassin versant continuent de connaître des augmentations de superficie évaluées à 3 601 km². La savane, quant à elle, est assujettie à une diminution de sa superficie. Cette conversion est évaluée à 3 091,88 km² de perte. La forêt continue de subir une régression sur cette période à environ 1 060,98 km². Les surfaces couvertes par l'eau et la zone humide continuent toujours de subir une régression estimée pour les deux classes à 1 072,12 km².

La tendance générale de 1985 à 2020 montre des changements dans l'occupation du sol surtout au niveau des cultures, de la forêt et des sols nus. Le tableau XII montre qu'entre 1985 et 2020, la classe forêt perd une superficie de 1 861,82 km² soit un taux de diminution de -3,89% de la superficie de la zone d'étude. La régression continue de la forêt se fait au profit des cultures et des sols nus. Ces derniers ont progressé de plus de 5 626 km² pour les cultures et de 2 209 km² pour les sols nus. Les classes eau et zone humide ont connu aussi durant la même période un taux de conversion respectif de -2,73% et -2,95%, soit une surface de 707,94 km² et de 1 012,66 km² au profit des cultures.

Tableau XII : Taux de conversion des surfaces entre les différentes périodes

Classes	Superficie 1985 (km ²)	Superficie 2003 (km ²)	Superficie 2020 (km ²)	Taux de conversion(%)		
				1985-2003	2003-2020	1985-2020
Eau	1 157,60	782,26	449,66	-2,20	-3,30	-2,73
Zone humide	1 590,53	1 317,39	577,87	-1,05	-4,99	-2,95
Forêt	2 525,16	1 724,32	663,34	-2,14	-5,78	-3,89
Savane	11 174,61	10 013,30	6 921,42	-0 61	-2,20	-1,38
Sols nus	1 144,59	1 729,89	3 353,87	2,27	3,82	3,02
Cultures	988,51	3 013,84	6 614,84	6,01	4,52	5,29
Total	18 581	18 581	18 581			

La figure 14 indique deux tendances d'évolution entre 1985 et 2003. D'une part, on note une diminution des superficies de la forêt, de la savane et de l'eau qui passent respectivement de 2

525,16 km² à 1 724,32 km², de 11 174,61 km² à 10 013,30 km² et de 1 157,60 km² à 782,26 km². D'autre part, on observe une augmentation des superficies occupées par les cultures et les sols nus qui passent respectivement de 988,51 km² à 3 013,84 km² et de 1 144,59 km² à 1 729,89 km². La zone humide quant à elle observe une réduction en passant de 1 590,53 km² à 1 317,39 km².

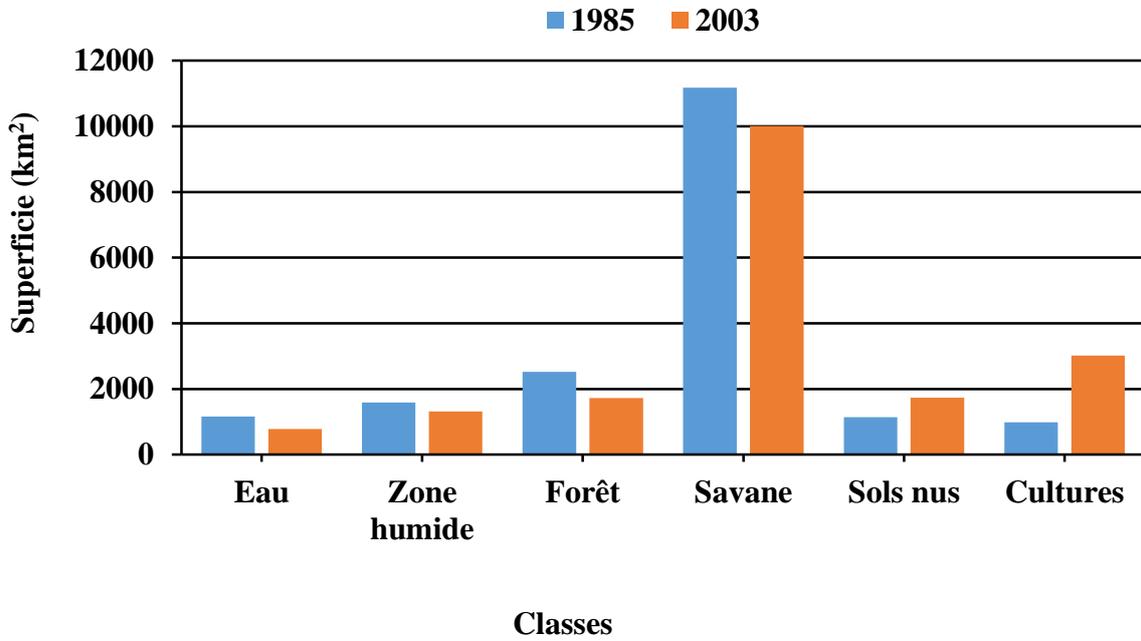


Figure 14 : Evolution des surfaces des classes d'occupation du sol du bassin versant entre 1985 et 2003

La figure 15 montre l'évolution des surfaces des différents types d'occupation du sol du bassin versant entre 2003 et 2020. Durant cette période, on note une diminution des superficies des forêts et de la savane qui passent respectivement de 1 724,32 km² à 663,34 km² et de 10 013,30 km² à 6 921,42 km². Par contre, on note, une augmentation continue et remarquable des cultures et des sols nus qui passent respectivement de 3 013,84 km² à 6 614,84 km² et de 1 144,59 km² à 3 353,87 km².

La classe zone humide connaît plus une régression de sa surface que celle de l'espace couverte par l'eau durant cette période, avec des aires passant de 1 317,39 km² à 577,87 km² pour la zone humide et de 782,26 km² à 449,66 km² pour la classe de l'eau.

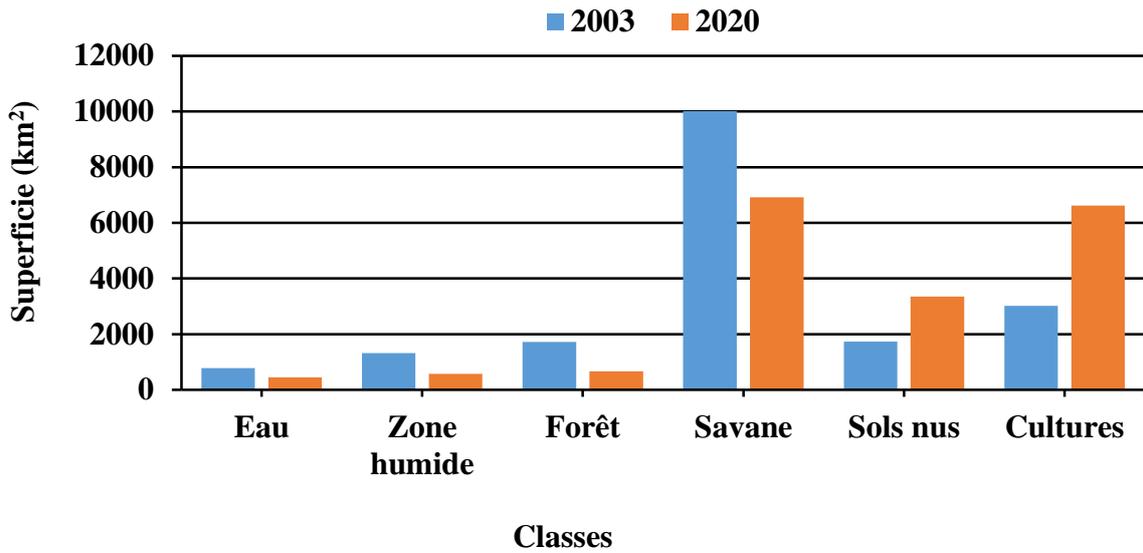


Figure 15 : Evolution des surfaces des classes d’occupation du sol du bassin versant entre 2003 et 2020

L’analyse globale de l’occupation du sol (Figure 16) montre une diminution des superficies de la forêt, de la savane, de l’eau et de la zone humide qui passent respectivement de 2 525,16 km² à 663,34 km², de 11 174,61 km² à 6 921,42 km², de 1 157,60 km² à 449,66 km² et de 1 590,53 km² à 577,87 km². On note une augmentation des superficies occupées par les sols nus et les cultures qui passent respectivement de 1 144,59 km² à 3 353,87 km² et de 988,51 km² à 6 614,84 km².

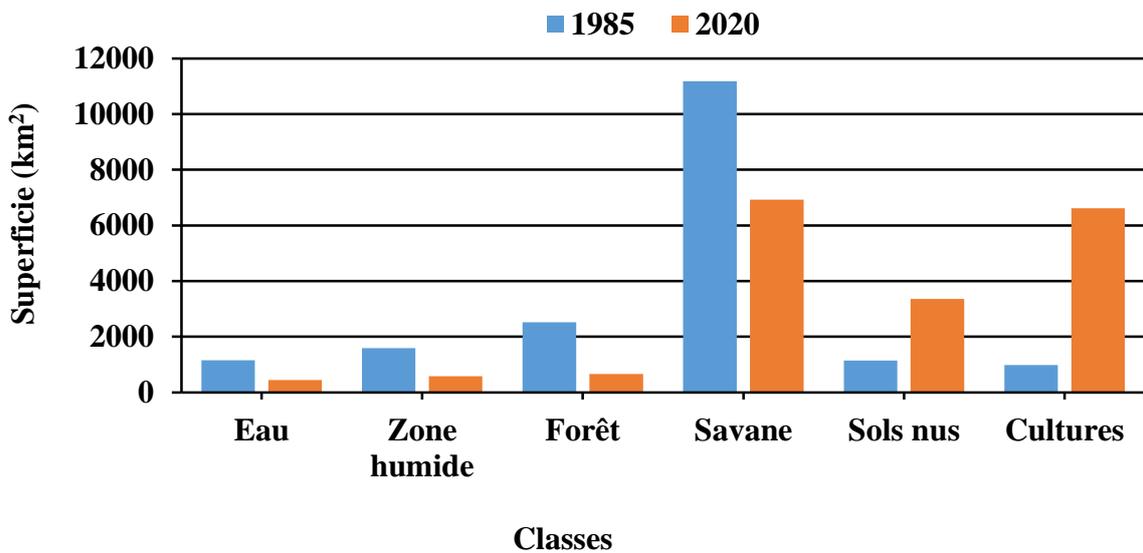


Figure 16 : Evolution des surfaces des classes d’occupation du sol du bassin versant entre 1985 et 2020

3.1.3. Modélisation du comportement hydrologique du bassin versant de la rivière Boa

3.1.3.1. Résultats du calage et validations du modèle GR2M

Les paramètres du modèle GR2M ainsi que les critères de performances obtenus à la fin des tests de calage et de validation sont consignés dans le tableau XIII. Le calage du modèle a porté sur cinq années de 1994 à 1999. Le coefficient de Nash obtenu est 73,3%. Ce résultat montre que sur cette période de calage, le modèle est satisfaisant. Il simule bien les débits de crues. Quant à la validation, elle a porté sur les périodes 2000-2010, 2011-2016 et 2000-2016. Les valeurs de Nash obtenues pour ces périodes sont respectivement 67,4% ; 69,8% et 66,3%.

Les hydrogrammes calculés et observés en calage et en validation pour les différentes périodes permettent de vérifier visuellement la performance du modèle utilisé (Figures 17 et 18).

De façon générale, il ressort des observations que les hydrogrammes calés et validés sont bien simulés. En effet, la dynamique des écoulements est bien respectée et les crues sont reproduites en calage et en validation.

Tableau XIII : Résultats du calage et validations du modèle GR2M

Période	Paramètre		Débit moyen (mm/mois)		Critère Nash (%)
	X1	X2	Observé	Simulé	
Calage					
1994 - 1999	7,41	0,38	24,7	25,05	73,3
Validations					
2000 - 2010	7,28	0,35	18,3	23,81	67,4
2011 - 2016	7,28	0,35	20,3	24,51	69,8
2000 - 2016	7,28	0,35	22,7	24,8	66,3

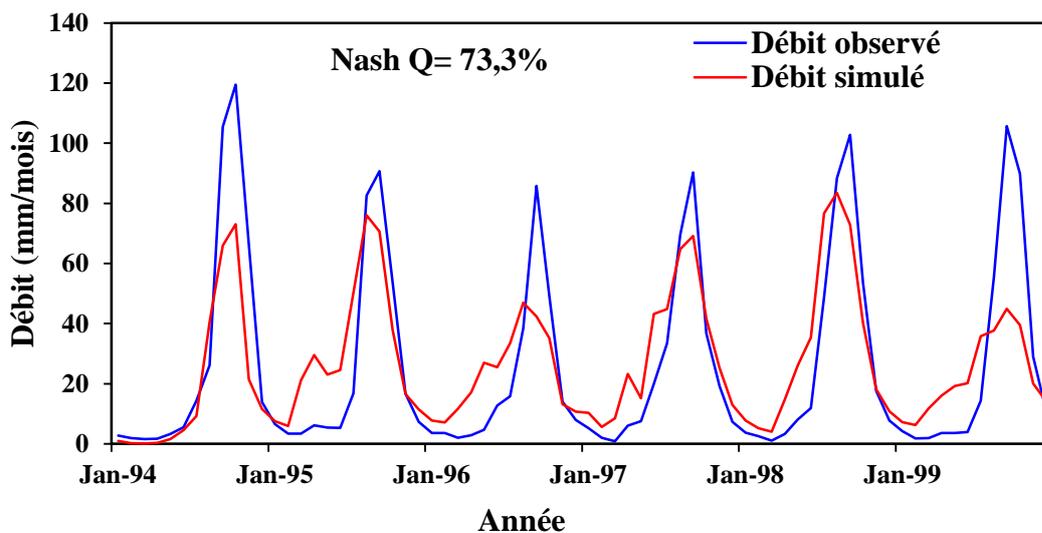


Figure 17 : Hydrogrammes observés et simulés à la station de Sorotona : calage (1994-1999)

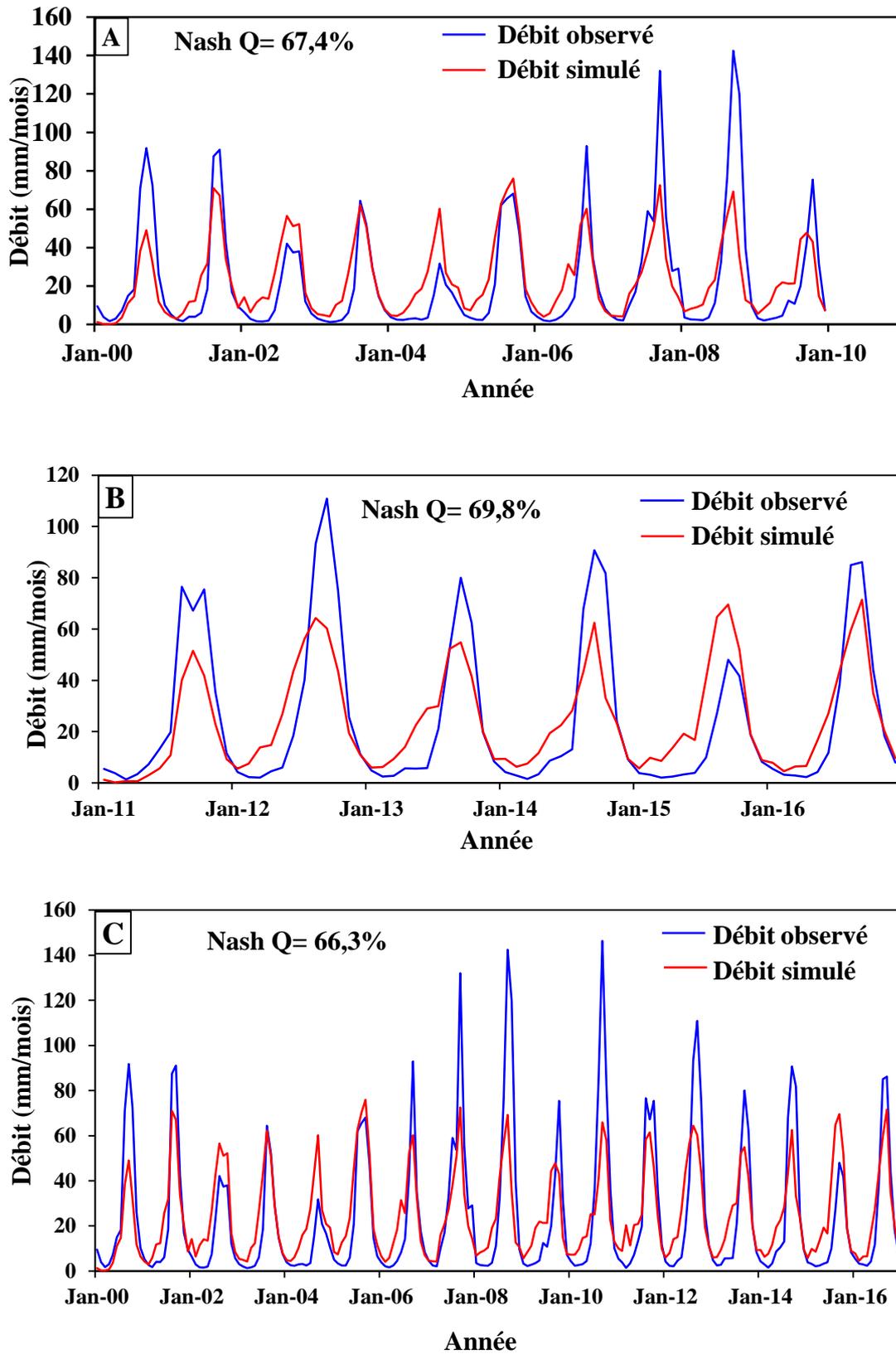


Figure 18 : Hydrogrammes observés et simulés à la station de Sorotona : validation (A=2000-2010 ; B=2011-2016 ; C=2000-2016)

3.1.3.2. Simulation des écoulements sur le bassin versant de la Boa de 1981 à 2016

Les débits sur le bassin versant de la Boa à Sorotona ont été simulés sur la série 1981-2016. Cette simulation a permis de calculer les paramètres du bilan hydrologique. Le résultat graphique de la simulation des débits sur toute la période d'observation (1981-2016) (Figure 19) montre une assez bonne représentation entre les débits calculés et observés qui évoluent ensemble. Néanmoins, des écarts existent entre les débits de pointe des hydrogrammes des débits simulés et des hydrogrammes des débits observés sur presque toute la période. En plus, les hydrogrammes simulés sont sous-estimés sur la majorité des années par les hydrogrammes des débits observés. Ainsi, les étiages ne sont pas correctement reproduits. Par contre, les hydrogrammes des débits simulés surestiment les hydrogrammes des débits observés sur les périodes 1989-1991, 2002-2005 et en 1984 et 2015.

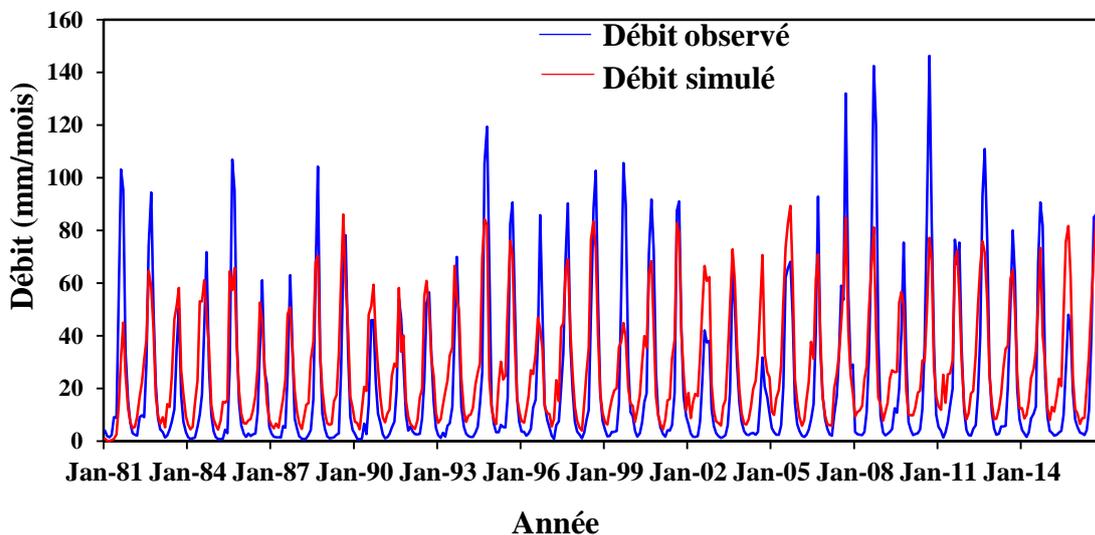


Figure 19 : Débits cumulés observés et calculés pour la période 1981-2016 à la station de Sorotona

3.1.3.3. Analyse des paramètres du bilan hydrologique

Le bilan hydrologique annuel calculé sur le bassin versant de la Boa sur la période 1981-2016, résume les sommes annuelles des paramètres du bilan de chaque année. La pluie moyenne annuelle vaut $1\,306,61 \text{ mm.an}^{-1}$. Cette pluviométrie moyenne interannuelle est répartie entre ces différentes composantes que sont l'évapotranspiration réelle (ETR), le ruissellement (R) et l'infiltration (I) (Figure 20). Leur analyse indique un important pourcentage de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui est de 65,15% avec une valeur moyenne annuelle de $851,27 \text{ mm.an}^{-1}$. Les lames d'eau infiltrées ou quantités d'eau destinées à une recharge des nappes sont de 24,33% avec une infiltration moyenne annuelle de $317,90 \text{ mm.an}^{-1}$.

Les infiltrations restent variables en fonction de la hauteur de la pluie incidente et les conditions de surface du bassin. Les ruissellements sont relativement peu abondants, car les écoulements de surface sont estimés à 10,52% avec un ruissellement annuel de 137,44 mm.an⁻¹. Il faut noter que les valeurs enregistrées pour tous les paramètres du bilan restent positives sur la période d'étude.

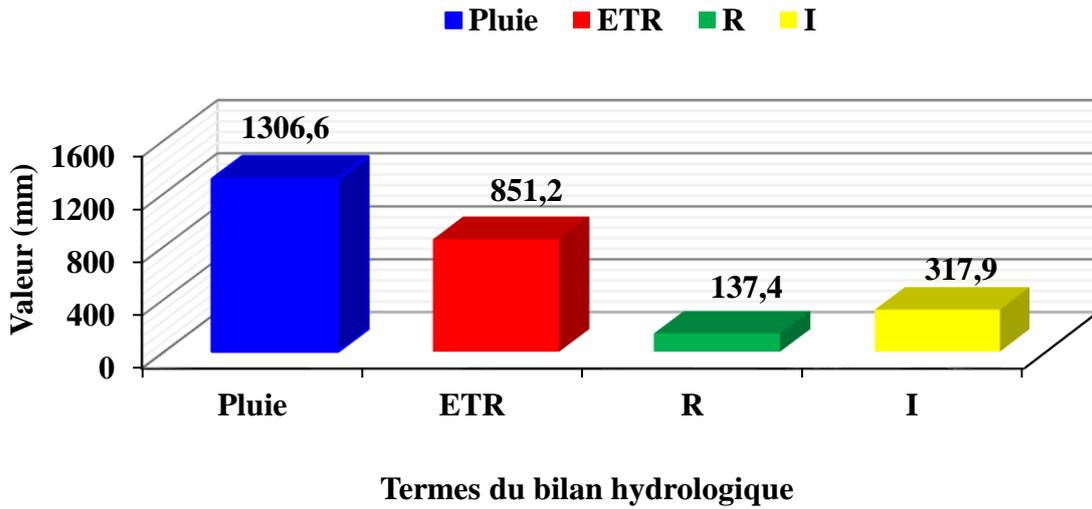


Figure 20 : Bilan hydrologique annuelle du bassin versant de la Boa sur la période 1981-2016

3.2. Discussion

Les résultats de la caractérisation de la variabilité hydroclimatique s'accordent sur la réalité d'une baisse de la pluviométrie sur le bassin versant en général. Cette baisse est variable selon les localités du bassin et serait liée à la variation des paramètres climatiques (Yao, 2015). L'analyse de l'indice standardisé de précipitations (SPI) a révélé que le bassin versant de la Boa a connu un important déficit pluviométrique après 1980 avec des pics de -1,79 ; -1,84 ; -1,87 et -2,78 respectivement en 1986, 2004, 1987 et 1991 comme la plupart des bassins versants en Côte d'Ivoire. Ces pics ont été caractérisés par des sécheresses de type sévèrement et extrêmement sec de par leurs intensités. Ces résultats sur la sécheresse sont similaires à ceux de Soro *et al.* (2014) sur la caractérisation des séquences de sécheresse météorologique dans l'extrême Nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Goula *et al.* (2006) ont montré que les décennies 1970-1979, 1980-1989 et 1990-1999 ont été des périodes sèches, cela est constaté dans le suivi de l'évolution des SPI à travers les deux stations du bassin versant. A l'Ouest du pays, les études de Savané *et al.* (2001) ont également mentionné une baisse de la pluviométrie sur la période 1970-2000. Selon Brou (2005), la baisse pluviométrique s'est intensifiée au cours des années 1980 et 1990 avant de connaître une légère hausse dans les années 2000, ce qui est le cas pour les stations de Borotou-Koro et de Beyla. Par ailleurs, l'analyse des valeurs de l'indice de sécheresse de débits (SDI) calculées a révélé que le bassin versant de la rivière Boa a connu un important déficit hydrologique après 1980 avec des pics en 1987, 1991 et 2004. Ces pics sont caractérisés par des sécheresses de types extrême et sévère. Cependant, le déficit pluviométrique n'explique pas toujours la tendance décroissante des apports. En effet, au-delà d'une réponse annuelle immédiate de l'écoulement des cours d'eau imputable à une saison des pluies déficitaires, la durabilité du déficit hydrologique est plutôt liée à l'effet cumulé des longues années de sécheresse. Ces résultats obtenus sont en accord avec ceux des travaux d'Olivry *et al.* (1998) et de Servat *et al.* (1998).

L'analyse diachronique des images montre une réduction des surfaces forestières et savaniques au profit des classes cultures et sols nus qui sont en progression sur le bassin versant. En effet, la forêt et la savane qui représentaient respectivement 13,59 % et 60,14 % de la surface totale du bassin en 1985 sont passées à 3,57 % et 37,25 % en 2020. Ces résultats obtenus sont en accord avec ceux des travaux de Kouadio (2011). Ainsi, la classe des cultures est passée de 5,32 % en 1985 à 16,22 % en 2003 et 35,6% en 2020 sur ledit bassin. En effet, la présence de fortes extensions d'aires de cultures dans la zone sur la période 1985-2020, est le fait de l'introduction de nouvelles cultures de rentes (coton, anacarde, manioc, etc.,) et des cultures irriguées (canne à sucre, riz irrigué, etc.,). Selon Avit *et al.* (1999), ces mesures d'introduction de nouvelles

cultures sont prises par la Côte d'Ivoire pour diversifier son agriculture. Par ailleurs la forte dégradation de la végétation dans le bassin versant de la Boa serait due aux activités anthropiques de l'homme sur le milieu naturel. Pour ses besoins vitaux, l'homme décime la végétation pour en faire son habitat, sa plantation, la voirie, ainsi que l'urbanisation anarchique en exerçant une forte pression sur la végétation. C'est ainsi que les classes de sols nus sont passées de 6,16 % en 1985 à 9,31 % en 2003 et à 18,05% en 2020 sur ledit bassin. Les coefficients de Kappa obtenus lors de la classification des images sont de 0,94, 0,90 et 0,96 respectivement pour 1985, 2003 et 2020. Ces coefficients sont compris entre 0,81 et 1. Selon Landis & Koch (1977), le coefficient de Kappa est excellent quand il est compris dans l'intervalle 0,81-1, donc les résultats des classifications sont fiables.

Le calage et la validation du modèle GR2M ont été réalisés afin de simuler le comportement hydrologique de la rivière Boa. Les résultats montrent que le critère de Nash obtenu en calage est dans l'ordre de plus de 70%, avec une valeur de 73,3% pour la période 1994-1999. Par contre, en validation, le modèle enregistre des valeurs de Nash dans l'ordre de plus de 60%. Ces critères d'efficacité de Nash sont respectivement 69,8% pour 2011-2016, 67,4% pour 2000-2010 et 66,3% pour 2000-2016. Ces résultats obtenus au cours des périodes de calage et de validation indiquent des performances satisfaisantes du modèle GR2M. L'obtention des valeurs du critère de Nash de plus de 60% à la validation et au calage est la preuve de la fiabilité des résultats comme prouvé par les travaux de Soro *et al.* (2017). Par ailleurs, plusieurs auteurs (Perrin, 2000 ; Sighomnou, 2004 ; Kouassi, 2007 ; Kouakou, 2011 ; Mangoua, 2013) ont montré une dégradation des valeurs de Nash en passant du calage à la validation. En effet, ces contres performances du modèle en validation peuvent s'expliquer par la qualité des données et la longueur de la période de validation. En outre, le modèle ne prend pas en compte les états de surface du bassin versant (occupation du sol, barrages hydro-agricoles). Les auteurs Albergel (1987), Kouamé *et al.* (1995), Casenave & Valentin (1996), Gellens & Scbadler (1997), ayant travaillé sur l'aptitude des bassins versants à ruisseler, ont montré que les facteurs qui influencent les modèles hydrologiques sont les propriétés du paysage et l'occupation du sol. En outre, la qualité du critère de Nash est très souvent fortement liée aux données qui constituent un élément majeur du processus de modélisation. Par ailleurs, l'observation générale des hydrogrammes a montré des écarts entre les hydrogrammes des débits simulés et observés sur les pointes de crues. Ces décalages (retard ou avance) de l'hydrogramme simulé pourraient s'expliquer en grande partie par les contrastes climatiques et le non prise en compte des états de surface du bassin versant (Kouakou, 2011).

Le modèle GR2M ainsi calé et validé a servi à effectuer les simulations sur la période 1981-2016. Ceci a permis de calculer les principaux paramètres du bilan hydrologique à l'échelle annuelle que sont les hauteurs de pluies (P), l'évapotranspiration réelle (ETR), les débits ou lames d'eau ruisselée (R) et la lame d'eau infiltrées ou l'infiltration (I). D'abord il ressort de ce bilan, que l'ETR est le paramètre dominant avec un pourcentage de 65,15% de la pluie pour une valeur de 851,27 mm.an⁻¹. L'importance de ce paramètre sur le bassin versant de la Boa est due à la mise à nu des sols due à l'agriculture et à la destruction du couvert forestier (Yao, 2015). Les résultats du bilan hydrologique obtenus se situent dans le même ordre de grandeur que ceux obtenus par Kouakou (2011), Mangoua (2013), Yao (2015) respectivement sur les bassins versants de la Comoé, de la Baya et de la Lobo. Ensuite, vient la lame d'eau infiltrée qui représente 24,33% de la pluie, avec une valeur de 317,90 mm.an⁻¹. Elle est destinée à alimenter les nappes d'eau souterraine. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Kouassi (2007), Kouakou (2011), Mangoua (2013) et Yao (2015) en Côte d'Ivoire. Les lames d'eau infiltrées dans ces études sont généralement comprises entre 10% et 30% des précipitations. Enfin, les lames d'eau ruisselées (débits) qui sont les écoulements de surface avoisinent 10,52% des précipitations moyennes du bassin versant, soit 137,44 mm.an⁻¹. Ces faibles valeurs des écoulements s'expliquent par les besoins domestiques et agropastoraux. Aussi, les caractéristiques morphologiques, physiques et physiographiques du bassin tels que les pentes, les formes, l'indice de compacité de Gravelius ainsi que l'occupation du sol peuvent servir d'exemple d'explication de ces faibles débits.

Conclusion partielle

L'analyse de la variabilité pluviométrique et hydrologique du bassin versant de la Boa a montré que la sécheresse pluviométrique entamée depuis les années 1981 dans le bassin versant se poursuit jusqu'en 2004. En outre, ces effets se sont traduits par une baisse de la pluviométrie et les indices SPI calculés sont compris entre -1,54 et -2,78. Cette baisse pluviométrique occasionne des déficits hydrométriques de l'ordre de -1,65 à -2,27 (indice SDI) sur le bassin versant de la Boa. L'étude de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant de la Boa a montré que le couvert végétal a connu une dégradation sur la période d'étude. La forêt et la savane ont connus respectif un taux d'évolution respectif de -3,89% et -1,38% au profit des cultures et des sols nus. Le modèle GR2M a donné des résultats satisfaisants malgré la faible densité du réseau de mesure constatée sur le bassin versant. Ces résultats ont permis de déterminer les caractéristiques hydrologiques du bassin versant. Le bilan hydrologique a été calculé, permettant ainsi de déceler les problèmes rencontrés sur le bassin versant.

CONCLUSION

CONCLUSION

Le présent mémoire a eu pour objectif de caractériser la dynamique de l'occupation du sol et son impact sur la réponse hydrologique du bassin versant de la rivière Boa. Pour ce faire, la démarche méthodologique s'est appuyée sur la caractérisation des changements climatiques à partir des données d'observations, la caractérisation de la dynamique de l'occupation du sol et la modélisation du comportement hydrologique.

La caractérisation de la variabilité hydroclimatique du bassin versant de la rivière Boa a permis de signaler la présence de sécheresse dans les différentes séries pluviométriques. Ainsi, l'analyse de l'indice SPI a montré sur la période 1981-2020, d'abord de fortes intensités de sécheresse variant de -1,54 à -2,78. Ces intensités ont été qualifiées de sévèrement sec et d'extrêmement sec. Ensuite, de longues périodes sèches, avec la durée maximale de 4 ans sur les périodes 1985-1988 et 1989-1992. Cette variabilité pluviométrique a occasionné des incidences négatives sur le régime du cours d'eau. En effet, l'analyse de l'indice de sécheresse de débits (SDI) a montré une diminution générale des débits moyens annuels de 1981 à 1994 avec des sécheresses de types sévère et extrême.

Concernant la caractérisation de la dynamique de l'occupation du sol, elle a permis de montrer que le couvert végétal a connu une mutation sur la période 1985-2020. La forêt et la savane sur le bassin versant de la Boa présentent un état de dégradation avancé avec un taux de conversion respectif de -3,89 % et -1,38%. Parallèlement à cette dégradation, les cultures et les sols nus ont connu un accroissement.

La modélisation du comportement hydrologique par le modèle conceptuel global GR2M a aussi révélé des perturbations de l'écoulement sur le bassin versant de la Boa. Il revient d'indiquer que le modèle GR2M ne convient pas pour modéliser le comportement d'un bassin qui comporte en son sein des aménagements hydrauliques surtout en période sèche. Toutefois, ce modèle a mieux simulé les écoulements du bassin versant. Les valeurs du critère de Nash obtenues sont satisfaisantes car elles sont de 73,3% pour le calage et de 69,8% (2011-2016) 67,4% (2000-2010) et 66,3% (2000-2016) pour la validation.

Le calcul du bilan hydrologique a permis d'évaluer ses principaux paramètres en vue d'estimer les eaux de surfaces et souterraines. Le bilan hydrologique effectué sur la période 1986-2016 a révélé une pluviométrie moyenne de 1306,61 mm et une perte par évapotranspiration réelle de 851,27 mm soit 65,15 % des précipitations. La lame d'eau ruisselée et infiltrée représente respectivement 137,44 mm et 317,9 mm, soit 10,52 % et 24,33 %, ce qui correspond à un taux de 34,85 % des précipitations.

Afin d'améliorer les résultats de cette étude, les perspectives suivantes sont énumérées :

CONCLUSION

- ✓ approfondir les travaux sur la dynamique de l'occupation du sol avec des images satellitaires de hautes résolutions pour la prévention des pratiques qui pourraient compromettre la qualité et la quantité de la ressource en eau ;
- ✓ utiliser un modèle distribué (CEQUEAU, SWAT) qui permet de prendre en compte les données physiographiques pour voir l'impact des cultures sur des bassins versants de très faible étendue.

REFERENCES

- Albergel J. (1987). Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface. Application aux petits bassins du Burkina Faso. *International Association of Hydrological Sciences*, 168 : 355-365.
- Ardoin-Bardin S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II (Montpellier, France), 437 p.
- Avit J.B., Pedia P.L. & Sankaré Y. (1999). Diversité biologique de la Côte d'Ivoire. Rapport de synthèse. Ministère de l'Environnement et de la Forêt, Côte d'Ivoire, 273 p.
- Begni G., Escadafal R., Fontannaz D. & Hong-Nganguyen A.T. (2005). La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification. *Les dossiers thématiques du Comité Scientifique Français de la Désertification*, 2 : 1-44.
- Bodian A. (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo*, 8 : 297-312.
- Brou T.Y. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille (Lille, France), 212 p.
- Brown D.G. & Duh J.D. (2004). Spatial simulation for translating from land use to land cover. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(1) : 35-60.
- Casenave A. & Valentin C. (1996). Etats de surface et transposition des données hydrologiques. *International Association of Hydrological Sciences*, 238 : 225-233.
- Corgne S., Hubert-Moy L., Mercier G. & Dezert J. (2004). Application of DSMT for land cover change prediction. In : *Advances and Applications of DSMT for information Fusion*. Smarandache F. & Dezert J. (Eds.), New Mexico (USA), pp. 371-382.
- Corgne S. (2014). Étude des changements d'occupation et d'usage des sols en contexte agricole par télédétection et fusion d'informations. Mémoire de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Rennes 2 (Rennes, France), 137 p.
- Coulibaly T.J.H. (2009). Répartition spatiale, gestion et exploitation des eaux souterraines : cas du département de Katiola, région des savanes de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 141 p.
- Faye C., Sow A.A. & Ndong J.B. (2015). Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo*, 9 : 17-35.

REFERENCES

- Gellens D. & Schadler B. (1997). Comparaison des réponses du bilan hydriques de bassins situés en Belgique et en Suisse à un changement de climat. *Revue des Sciences de l'Eau*, 10(3) : 395-414.
- Giddings L., Soto M., Rutherford B.M. & Maarouf A. (2005). Standardized precipitation index zones for Mexico. *Atmosfera*, 18(1) : 33-56.
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Rapport de synthèse, Genève (Suisse), 103 p.
- Goula B.T.A., Savané I., Konan B., Fadika V. & Kouadio G.B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*, 1 : 1-12.
- Hingray B., Picouet C. & Musy A. (2009). Hydrologie 2 : Une science pour l'ingénieur. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Suisse), 54, 601 p.
- Hubert-Moy L., Cottonneq A., Le-Du L., Chardin A. & Perez P. (2001). A comparison of parametric classification procedures of remotely sensed data applied on different landscape units. *Remote Sensing of Environment*, 75(2) : 174-187.
- INS- Institut National de la Statistique (2015). Répertoire des localités : Région du Bafing, 34 p.
- Jensen J.R. (1983). Urban/suburban land use analysis. *In* : Manual of remote sensing. Colwell R.N. (Ed.), Virginia (USA), pp. 1571-1666.
- Kabouya M. (1990). Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay (Paris, France), 347 p.
- Kabouya M. & Michel C. (1991). Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des Sciences de l'Eau*, 4(4) : 569-587.
- Kouadio Z.A. (2011). Dynamique de l'occupation du sol et comportement hydrologique : cas des bassins versants côtiers de l'Agnéby et du Boubo (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 199 p.
- Kouakou K. E. (2011). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Comoé. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 186 p.
- Kouamé B., Servat J.E. & Dezetter A. (1995). Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau en Côte d'Ivoire. *International Association of Hydrological Sciences*, 238 : 343-354.

REFERENCES

- Kouassi A.M. (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi (Bandama). Thèse de Doctorat, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 210 p.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Yao K.B., Kouamé K.A., Oularé S. & Biémi J. (2011). Modélisation des débits mensuels par un modèle conceptuel : application à la caractérisation de la relation pluie-débit dans le bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Journal Africain de Communication Scientifique et Technologique*, 11 : 1409-1425.
- Landis J.R. & Koch G.G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33 : 159-174.
- Lavabre J., Sempere Torres D. & Cernesson F. (1993). Changes in the hydrological response of a small mediterranean basin a year after a wildfire. *Journal of Hydrology*, 142: 273-299.
- Mahé G. & Olivry J.C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6(1) : 109-117.
- Makhlouf Z. & Michel C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162 : 299-318.
- Malika A., Mariem A. & Ahmed F. (1997). Utilisation des images HRV de SPOT pour la détection du changement périurbain. In : *Télé-détection des milieux urbains et périurbains*. Édition AUPELF-UREF, Casablanca (Maroc), pp. 275-282.
- Mangoua O.M.J. (2013). Evaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 169 p.
- Mckee T.B., Doesken N.J. & Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to Time Scale. 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim (California), pp. 179-184.
- Merrien-Soukatchoff V. (2008). Hydrologie et hydrogéologie. Ecole des mines de Nancy, Nancy (France), 89 p.
- Mouehli S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, Université Paris VI (Paris, France), 323 p.

- Mouelhi S., Michel C., Perrin C. & Andréassian V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318 : 200-214.
- Nalbantis I. & Tsakiris G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23 : 881-897.
- Nash J.E. & Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3) : 282-290.
- Olivry J.C., Mahé G. & Bricquet J.P. (1998). Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. *In : Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*. Servat E., Hugues D., Fritsch J.M. & Hulme M. (Eds.), Abidjan (Côte d'Ivoire), pp. 89-197.
- OMM- Organisation Mondiale de la Météorologie (2012). Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé, Genève (Suisse), 1090, 25 p.
- Perrin C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (Grenoble, France), 287 p.
- Roudier P. & Mahé G. (2010). Calcul des pluies et débits classés sur le bassin du Bani (Mali) : une approche de la vulnérabilité des ouvrages et de la population depuis la sécheresse. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(3) : 351-363.
- Savané I., Coulibaly K.M. & Gioan P. (2001). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, 12(4) : 231-237.
- Servat E. & Dezetter A. (1992). Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau dans le Nord-ouest de la Côte d'Ivoire. *Hydrologie Continentale*, 7(2) : 129-142.
- Servat E., Paturol J.E. & Lubès-Niel H. (1996). La sécheresse gagne l'Afrique tropicale. *La Recherche*, 290 : 24-25.
- Servat E., Paturol J.E., Lubès-Niel H., Kouamé B., Ouedraogo M. & Masson J.M. (1997). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 191 : 1-15.
- Servat E., Paturol J.E., Kouamé B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.F., Lubès-Niel H., Fritsch J.M., Masson J.M. & Marieu B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *In*

REFERENCES

- : Water Resources Variability in Africa during XXth Century. Servat E., Hugues D., Fritsch J.M. & Hulme M. (Eds.), Abidjan (Côte d'Ivoire), pp. 323-337.
- Sighomnou D. (2004). Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé 1 (Yaoundé, Cameroun), 290 p.
- Soro G.E., Anouman D.G.L., Goula B.T.A., Srohorou B. & Savané I. (2014). Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l'extrême Nord-ouest de la Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, 18 : 107-124.
- Soro G.E., Yao A.B., Kouamé M.Y. & Goula B.T.A. (2017). Climate change and its impacts on water resources in the Bandama basin, Côte d'Ivoire. *Hydrology*, 4(1) : 1-13.
- Tagini B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire : essai de géotectonique régionale. Thèse de Doctorat, Université de Lausanne (Lausanne, Suisse), 302 p.
- Turner B.L., Lambin E.F. & Reenberg A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, 104(52) : 20666-20671.
- Vidal J.P. & Wade S. (2009). A multimodel assessment of future climatological droughts in the United Kingdom. *International Journal of Climatology*, 29(14) : 2056-2071.
- Wu H., Hayes M.J., Wilhite D.A. & Svoboda M. (2005). The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal Climatology*, 25(4) : 505-520.
- Yao A.B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire), 192 p.
- Yao N.P. (2019). Production sucrière et développement local dans le département de Koro. Thèse de Doctorat, Université Alassane Ouattara (Bouaké, Côte d'Ivoire), 417 p.

RESUME

Cette étude a pour objectif d'étudier l'influence de la dynamique de l'occupation du sol sur le comportement hydrologique de la rivière Boa. Pour ce faire, les indices de sécheresse (SPI, SDI), les cartes d'occupation du sol (1985, 2003, 2020) et le modèle GR2M ont été utilisés. L'analyse des indices de sécheresse a montré que le bassin versant a connu des années de sécheresse. Ces épisodes secs ont atteint leur pic maximal en 1987 avec un indice de -2,78. Le traitement des cartes d'occupation du sol montre la disparition du couvert végétal au profit des aires de cultures. Les taux de conversion déterminés sont de -5,27% pour la végétation et de 5,29% pour les cultures. Le modèle GR2M a donné des résultats satisfaisants en calage et en validation, avec des valeurs respectives de 73,3% ; 69,8% ; 67,4% et 66,3%. Par conséquent, le modèle GR2M est performant sur le bassin versant. Le bilan hydrologique a montré que l'ETR de l'ordre 851,27 mm, est le paramètre le plus dominant soit 65,15% de perte de la pluie annuelle estimée à 1 306,61 mm sur le bassin versant de la Boa à Sorotona.

Mots clés : Bassin versant de la Boa, variabilité hydroclimatique, occupation du sol, modèle GR2M.

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the influence of land cover dynamics on the hydrological behavior of the Boa River. To do this, drought indices (SPI, SDI), land use maps (1985, 2003, 2020) and the GR2M model were used. Analysis of drought indices has shown that the watershed has experienced years of drought. These dry episodes reached their maximum peak in 1987 with an index of -2.78. The treatment of land use maps shows the disappearance of vegetation cover in favor of cultivated areas. The conversion rates determined are -5.27% for vegetation and 5.29% for crops. The GR2M model gave satisfactory results in calibration and validation, with respective values of 73.3%; 69.8%; 67.4% and 66.3%. Therefore, the GR2M model is effective in the watershed. The hydrological balance showed that the ETR of the order 851.27 mm, is the most dominant parameter, i.e. 65.15% of annual rainfall loss estimated at 1,306.61 mm on the Boa watershed in Sorotona.

Keywords : Boa watershed, hydroclimatic variability, land use, GR2M model