



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 : 0456/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI 0416008722

LABORATOIRE DES

SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET
DISPONIBILITÉ EN EAU DU BASSIN
VERSANT DE LA RIVIÈRE SAN PEDRO
(SUD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

KOMEY Konan Abel

JURY

**Président : M. DONGUI Bini Kouamé, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Encadreur : Mme. YAO Affoué Berthe Epse TOURE, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé**

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

Soutenu publiquement le :

13/10/2021



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :

2020-2021

N° D'ORDRE : 0456/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI 0416008722

LABORATOIRE DES

SCIENCES ET

TECHNOLOGIES DE

L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET
DISPONIBILITÉ EN EAU DU BASSIN
VERSANT DE LA RIVIÈRE SAN PEDRO
(SUD-OUEST DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

KOMEY Konan Abel

JURY

Président : M. DONGUI Bini Kouamé, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé

Encadreur : Mme. YAO Affoué Berthe Epse TOURE, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé

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

Soutenu publiquement le :

13/10/2021

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

Je saisis l'opportunité pour remercier l'administration de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa avec à sa tête Mme TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE, Professeur Titulaire, pour son dévouement et le travail abattu pour l'avancée de cette Université.

J'adresse mes remerciements à tout le personnel de l'UFR Environnement de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa avec à sa tête Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur scientifique de ce mémoire, pour leur disponibilité et l'excellent suivi dont j'ai bénéficié durant ma formation.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Docteur DIBI Brou, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) pour ses conseils.

J'exprime ma profonde gratitude à M. TOURE Née YAO Affoué Berthe, Maître-Assistant, qui m'a fait l'honneur d'encadrer ce mémoire. Au-delà d'un encadrement scientifique de qualité, elle a toujours su prendre le temps de m'écouter. Je ne saurais trouver les mots justes pour lui exprimer toute ma gratitude.

Je suis reconnaissant à Docteur KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences, pour sa grande contribution à la réalisation de ce travail.

Je voudrais témoigner toute ma reconnaissance à Docteur MANGOUA Oi Mangoua Jules, Responsable de la filière « Génie de l'Eau et de l'Environnement » pour ses conseils et le suivi dont j'ai bénéficié depuis mon arrivée à l'UFR Environnement.

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

Mes sincères remerciements vont à l'endroit de Docteur BROU Loukou Alexis, Assistant, ainsi qu'aux doctorants KOFFI Béranger, OUEDE Gla Blaise, TOURE Fanraban Fabrice, AKAFFOU Franck Hervé et COULIBALY Brice pour leur sympathie et leur aide inestimables. Je ne saurais oublier mes condisciples de la promotion 2020-2021 de la filière Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE) pour leur appui.

Je suis redevable envers mes parents et mes tuteurs pour l'amour, le soutien moral, matériel et financier dont ils m'ont toujours fait bénéficier. Je ne saurais trouver les mots justes pour leur dire infiniment merci.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----|
| REMERCIEMENTS | i |
| TABLE DES MATIÈRES | iii |
| SIGLES ET ABRÉVIATIONS | v |
| LISTE DES TABLEAUX..... | vi |
| LISTE DES FIGURES..... | vii |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS | 3 |
| 1.1. Présentation de la zone d'étude | 3 |
| 1.1.1. Situation géographique..... | 3 |
| 1.1.2. Caractéristiques physiques du bassin versant de la rivière San Pedro | 3 |
| 1.1.3. Climat..... | 4 |
| 1.1.4. Relief | 5 |
| 1.1.5. Végétation | 5 |
| 1.1.6. Hydrographie..... | 6 |
| 1.1.7. Géologie | 8 |
| 1.1.8. Pédologie..... | 8 |
| 1.1.9. Situation socio-économique | 10 |
| 1.1.9.1. Économie..... | 10 |
| 1.1.9.2. Population..... | 10 |
| 1.2. Généralités sur les changements climatiques | 11 |
| 1.2.1. Définition des changements climatiques..... | 11 |
| 1.2.2. Extrêmes climatiques | 11 |
| 1.2.2.1. Définition | 11 |
| 1.2.2.2. Classification des extrêmes climatiques..... | 12 |
| Conclusion partielle..... | 13 |
| DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES | 14 |

| | |
|--|-----------|
| 2.1. Matériel | 14 |
| 2.1.1. Données | 14 |
| 2.1.2. Outils de traitement des données | 14 |
| 2.2. Méthodes | 14 |
| 2.2.1. Caractérisation de la variabilité des paramètres climatiques extrêmes | 14 |
| 2.2.2. Détermination de l'influence des précipitations extrêmes sur l'évolution des débits de la rivière San Pedro | 17 |
| 2.2.2.1. Calcul de la tendance linéaire des indices de débits..... | 17 |
| 2.2.2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) | 19 |
| 2.2.2.3. Méthode de régression linéaire multiple | 20 |
| Conclusion partielle..... | 21 |
| TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION | 22 |
| 3.1. Résultats | 22 |
| 3.1.1. Caractérisation de la variabilité des paramètres climatiques extrêmes | 22 |
| 3.1.1.1. Tendance d'évolution des indices de précipitations extrêmes | 22 |
| 3.1.1.2. Tendance d'évolution des indices de températures extrêmes | 25 |
| 3.1.1.3. Tendance d'évolution de la relation pluie-débit de la rivière San Pedro | 29 |
| 3.1.2. Détermination de l'influence des paramètres climatiques extrêmes sur l'évolution des débits de la rivière San Pedro | 30 |
| 3.1.2.1. Calcul de la tendance linéaire des indices de débits..... | 30 |
| 3.1.2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) | 31 |
| 3.1.2.3. Approche paramétrique par modèles linéaires | 34 |
| 3.2. Discussion | 34 |
| Conclusion partielle..... | 37 |
| CONCLUSION | 38 |
| RÉFÉRENCES..... | 38 |

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

| | |
|----------------|--|
| ACP | : Analyse en Composantes Principales |
| AEP | : Alimentation en Eau Potable |
| BRGM | : Bureau de Recherches Géologiques et Minières |
| CCNUCC | : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques |
| CIE | : Compagnie Ivoirienne d'Electricité |
| ETCCDI | : Expert Team on Climate Change Detection and Indices |
| FAO | : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture |
| GEE | : Génie de l'Eau et de l'Environnement |
| GIEC | : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat |
| IPCC | : Intergovernmental Panel on Climate Change |
| IRD | : Institut de Recherche pour le Développement |
| LSTE | : Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement |
| MINEF | : Ministère des Eaux et Forêts |
| NWS | : National Weather Service |
| OMM | : Organisation Mondiale de la Météorologie |
| ONERC | : Observation Nationale sur les Effets du Réchauffement Climatique |
| RGPH | : Recensement Général de la Population et de l'Habitat |
| SAPH | : Société Africaine de Plantation d'Hévéa |
| SASCA | : Domaine Sassandra-Cavally |
| SODECI | : Société de Distribution d'Eau de la Côte d'Ivoire |
| SODEMI | : Société de Développement Minier de la Côte d'Ivoire |
| SODEXAM | : Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau I : Caractéristiques physiques du bassin versant de la rivière San Pedro | 4 |
| Tableau II : Indices de températures extrêmes (Zhang & Yang, 2004) | 16 |
| Tableau III : Indices de précipitations extrêmes (Zhang & Yang, 2004)..... | 16 |
| Tableau IV : Indices de débits (Programme d'adaptation en Afrique 2008-2012) (Hallouz <i>et al.</i> , 2019) | 18 |
| Tableau V : Coefficients de pente des indices suivant la distribution du test <i>t</i> -Student..... | 28 |
| Tableau VI : Valeurs propres et variance des différents axes de G1 | 31 |
| Tableau VII : Valeurs propres et variance des différents axes de G2 | 32 |
| Tableau VIII : Matrice de corrélation G1 | 32 |
| Tableau IX : Matrice de corrélation G2..... | 33 |
| Tableau X : Modèles linéaires | 34 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Localisation du bassin versant de la rivière San Pedro..... | 3 |
| Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de San Pedro sur la période 1989-2019 | 4 |
| Figure 3 : Carte du relief du bassin versant de la rivière San Pedro | 5 |
| Figure 4 : Carte de la végétation du bassin versant de la rivière San Pedro (IRD, 1979)..... | 6 |
| Figure 5 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la rivière San Pedro | 7 |
| Figure 6 : Carte géologique du bassin versant de la rivière San Pedro (IRD, 1979) | 8 |
| Figure 7 : Carte pédologique du bassin versant de la rivière San Pedro (IRD, 1979) | 10 |
| Figure 8 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'indice PRCPTOT à la station de San Pedro sur la période 1989-2019..... | 22 |
| Figure 9 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices CWD (a) et CDD (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019 | 23 |
| Figure 10 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices RX1day (a) et RX5day (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019 | 24 |
| Figure 11 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices R95p (a) et R99p (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019..... | 25 |
| Figure 12 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices CSDI (a) et WSDI (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019..... | 26 |
| Figure 13 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'indice DTR à la station de San Pedro sur la période 1989-2019 | 26 |
| Figure 14 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices TXx (a) et TNx (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019 | 27 |
| Figure 15 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices TXn (a) et TNn (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019 | 28 |
| Figure 16 : Évolution mensuelle pluie-débit de la rivière San Pedro de 1989 à 2013..... | 29 |
| Figure 17 : Évolution interannuelle pluie-débit de San Pedro de 1989 à 2013..... | 30 |
| Figure 18 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices Fmin1day (a) et Fmax1day (b) à la station de Fayé sur la période 1989-2013 | 31 |
| Figure 19 : Cercle de corrélation du groupe de variables G1..... | 33 |
| Figure 20 : Cercle de corrélation du groupe de variables G2..... | 34 |

INTRODUCTION

Introduction

L'eau est la plus importante de toutes les ressources naturelles. Elle est vitale pour tous les organismes vivants, aussi bien pour la santé humaine, que pour la production alimentaire et le développement économique (Fadika, 2012). Malheureusement, la disponibilité de cette ressource est fortement influencée par l'inégale répartition de la population et des effets des changements climatiques (Luxorion, 2010). En effet, l'augmentation de l'utilisation de l'eau douce est due à l'augmentation incessante de la demande en eau causée par l'accroissement démographique au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle (Fadika, 2012). Cette augmentation de la demande en eau devrait réduire la quantité d'eau douce disponible de 70% en 2025 (Postel *et al.*, 1996). Or, l'eau de surface facilement accessible et renouvelable ne représente que 0,01% de la ressource totale en eau de la planète (FAO, 2012). Selon le GIEC (2007), l'évolution du climat est due aux activités anthropiques (feux de brousse, transports routiers et aériens, mines de charbon, etc.). Les conséquences de ces changements climatiques sont bien visibles avec l'avènement des événements extrêmes tels que les inondations et les sécheresses. Ainsi, pour éviter ou atténuer toute situation de pénurie future, la maîtrise de l'eau devient un enjeu primordial et mondial (Fadika, 2012).

Dans ce contexte, la principale inquiétude porte sur les pays africains qui figurent au premier rang des régions concernées par la question de l'impact des perturbations climatiques sur les ressources en eau. En effet, des études réalisées en Afrique de l'Ouest et Centrale ont mis en évidence une baisse considérable de la pluviométrie depuis le début des années 1970 (Mahé *et al.*, 2000 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; Goula *et al.*, 2006 ; Kouassi, 2007 ; Kouakou *et al.*, 2007 ; Vissin, 2007 ; Bates *et al.*, 2008 ; Kouakou, 2011 ; Yao *et al.*, 2012 ; Kouassi *et al.*, 2013). En Côte d'Ivoire, un déficit de 21% des hauteurs de pluie annuelle a été observé entre 1966 et 1971 (Servat *et al.*, 1999). Ce déficit a entraîné une baisse des écoulements des cours d'eau de 47% en moyenne (Ouédraogo, 2001).

Au niveau de la rivière San Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire), les travaux de Fadika (2012) ont montré une baisse de la pluviométrie de 30% sur les périodes 1973-1983 et 1992-2004. La baisse des écoulements qui en découle est de 33% au niveau des débits entre 1980 et 1990. Cette situation engendre le problème de disponibilité en eau à l'exhaure de la SODECI à San Pedro notamment en période d'étiage.

En outre, parallèlement aux aléas du climat, la demande en eau s'accroît. Face à l'accroissement démographique et au besoin en eau croissant, il devient nécessaire de chercher une autre source d'approvisionnement en eau potable pour la ville de San Pedro. Le choix s'est porté sur le lac créé par le barrage de Fayé alimenté par la rivière San Pedro non loin de la ville de San Pedro.

Introduction

Or cette rivière, en plus d'être principalement utilisée pour la production d'électricité à partir du barrage hydroélectrique de Fayé, elle est également utilisée par la Société Africaine de Plantation d'Hévéa (SAPH) pour la transformation d'hévéa. Malheureusement, les études hydrologiques mené sur le bassin versant de la rivière San Pedro sont moins nombreuses. Face à la pression anthropique exercée sur la rivière San Pedro, il devient nécessaire de mener cette étude intitulée : « **Changements climatiques et disponibilité en eau du bassin versant de la rivière San Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)** ». L'objectif général de cette étude est d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la disponibilité en eau du bassin versant de la rivière San Pedro.

De façon spécifique, il s'agit de :

- caractériser la variabilité des paramètres climatiques extrêmes (précipitation et température) du bassin versant de la rivière San Pedro ;
- déterminer l'influence des précipitations extrêmes sur l'évolution des débits de la rivière San Pedro.

Le présent mémoire s'articule autour de trois parties. La première partie porte sur les généralités sur la zone d'étude et les changements climatiques (les extrêmes climatiques). La deuxième partie porte sur le matériel et les méthodes utilisés. La troisième partie aborde les résultats et la discussion. Une conclusion générale comportant des perspectives d'étude achève ce mémoire.

PREMIÈRE PARTIE :
GÉNÉRALITÉS

1.1. Présentation de la zone d'étude

1.1.1. Situation géographique

Le bassin versant de la rivière San Pedro est situé au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 6°30' et 7°6' Ouest et les latitudes 4°42' et 5°36' Nord (figure 1). Sa superficie est de 3 553 km² et la rivière San Pedro qu'il draine est longue d'environ 112 km. La majeure partie du bassin est couverte par le département de San Pedro et l'extrême Nord par les départements de Méagui, Oupoyo et légèrement celui de Soubré.

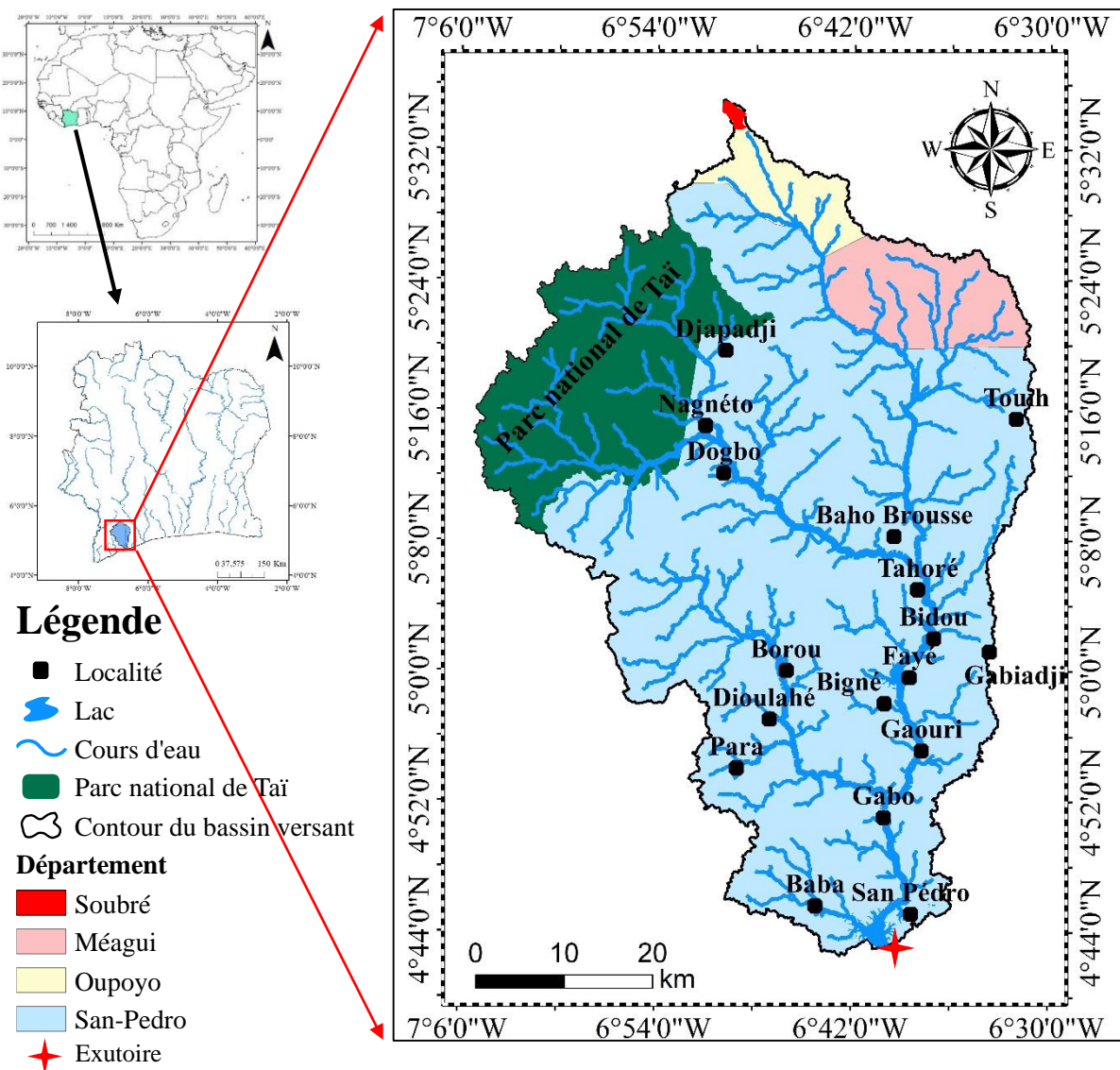


Figure 1 : Localisation du bassin versant de la rivière San Pedro

1.1.2. Caractéristiques physiques du bassin versant de la rivière San Pedro

Le tableau I présente les caractéristiques physiques du bassin versant de la rivière San Pedro.

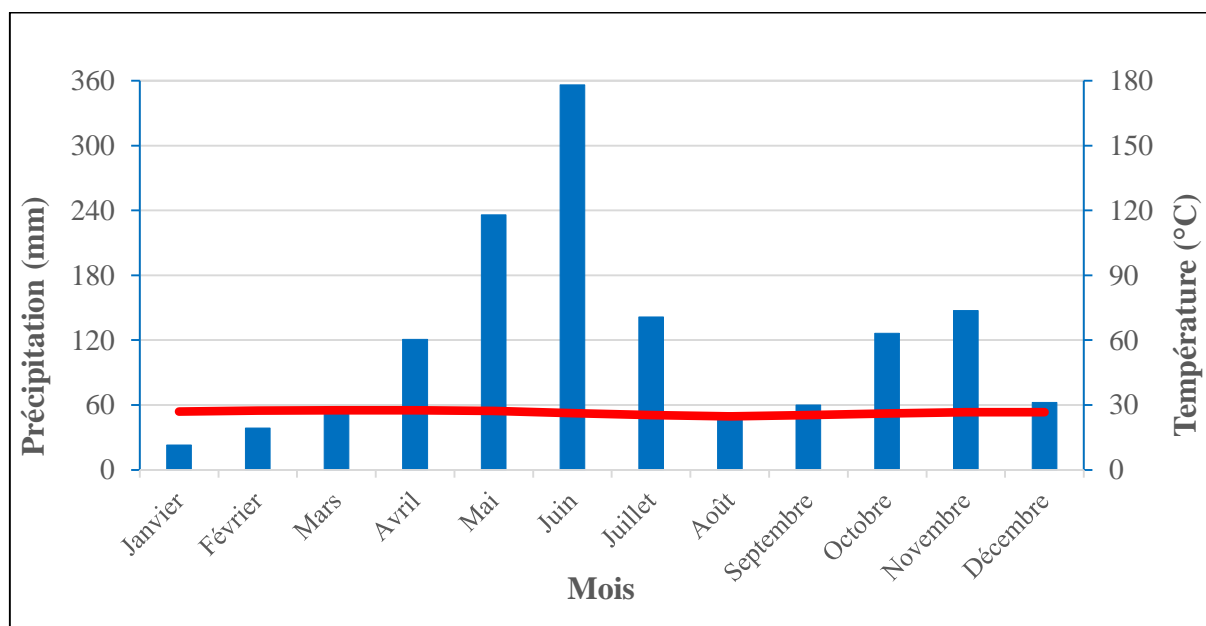
Tableau I : Caractéristiques physiques du bassin versant de la rivière San Pedro

| Caractéristiques | Valeurs |
|--|---------|
| Superficie (km ²) | 3 553 |
| Périmètre (km) | 285 |
| Indice de compacité de Gravelius (K _c) | 1,33 |
| Longueur du rectangle équivalent (km) | 105,88 |
| Largeur du rectangle équivalent (km) | 31,84 |

1.1.3. Climat

Le bassin versant de la rivière San Pedro appartient au régime climatique de type équatorial de transition (climat attién) caractérisé par quatre saisons (deux saisons sèches et deux saisons humides) réparties comme suit (figure 2) :

- une grande saison des pluies d’Avril à Juillet avec un maximum de 356 mm en Juin ;
- une petite saison sèche d’Août et parfois en Septembre ;
- une petite saison des pluies, très irrégulière qui s’étend de Septembre à Novembre ou Décembre ;
- une grande saison sèche de Décembre à Mars.

**Figure 2** : Diagramme ombrothermique de la station de San Pedro sur la période 1989-2019

Dans ce régime équatorial de transition, l'air est généralement humide. L'humidité de l'air dans la zone d'étude est comprise entre 82 et 88 %. Au cours de la grande saison sèche, un vent sec (l'harmattan) venant du Nord souffle pendant quelques jours sur la région (De Lasme, 2013).

1.1.4. Relief

Le relief du bassin est peu accentué. Seules, quelques collines situées au Nord-Ouest et dont les sommets culminent à 428 m rompent sa monotonie. Près de 70 % de sa superficie est comprise entre 0 m et 300 m d'altitude de l'aval à l'amont du bassin versant (figure 3). Les altitudes supérieures à 300 m sont situées tout juste à l'extrême nord du bassin.

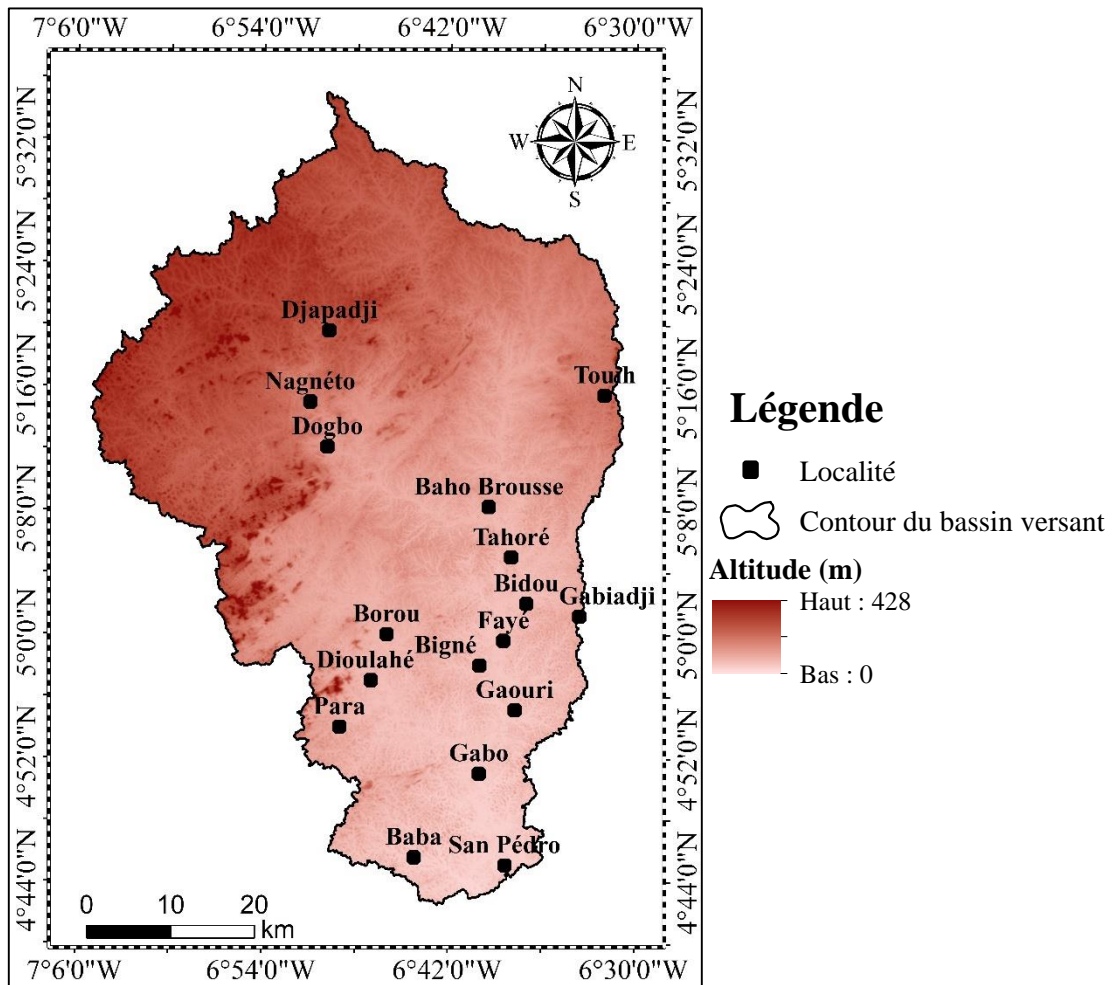


Figure 3 : Carte du relief du bassin versant de la rivière San Pedro

1.1.5. Végétation

La région est située dans le secteur de la forêt dense humide du domaine guinéen. Ce secteur se caractérise par une magnifique forêt luxuriante appelée « Forêt sempervirente » (Monnier *et al.*, 1974). C'est une forêt hygrophile, comprise à l'intérieur d'une zone où la pluviométrie annuelle est au moins égale à 1420 mm. Particulièrement riche en espèces nobles (acajou,

okoumé, teck), cette forêt abritait au moins 130 espèces d'arbres atteignant 30 à 40 m de haut, 120 autres atteignant 20 à 25 m, et 350 espèces d'arbustes (Fadika, 2012). La végétation est constituée par les espèces *Mapania spp* et *Diospyros spp* dont le feuillage se renouvelle perpétuellement. Il y a également des zones de forêt pauvre en grands arbres, à sous-bois épais, riches en lianes et arbustes que l'on rencontre sur la pédiplaine et les savanes des basses côtes laissent apparaître par endroits des végétations herbeuses marquées par des rôniers (De Lasme, 2013). Le parc national de Taï est situé au Nord-Ouest de la zone d'étude (figure 4).

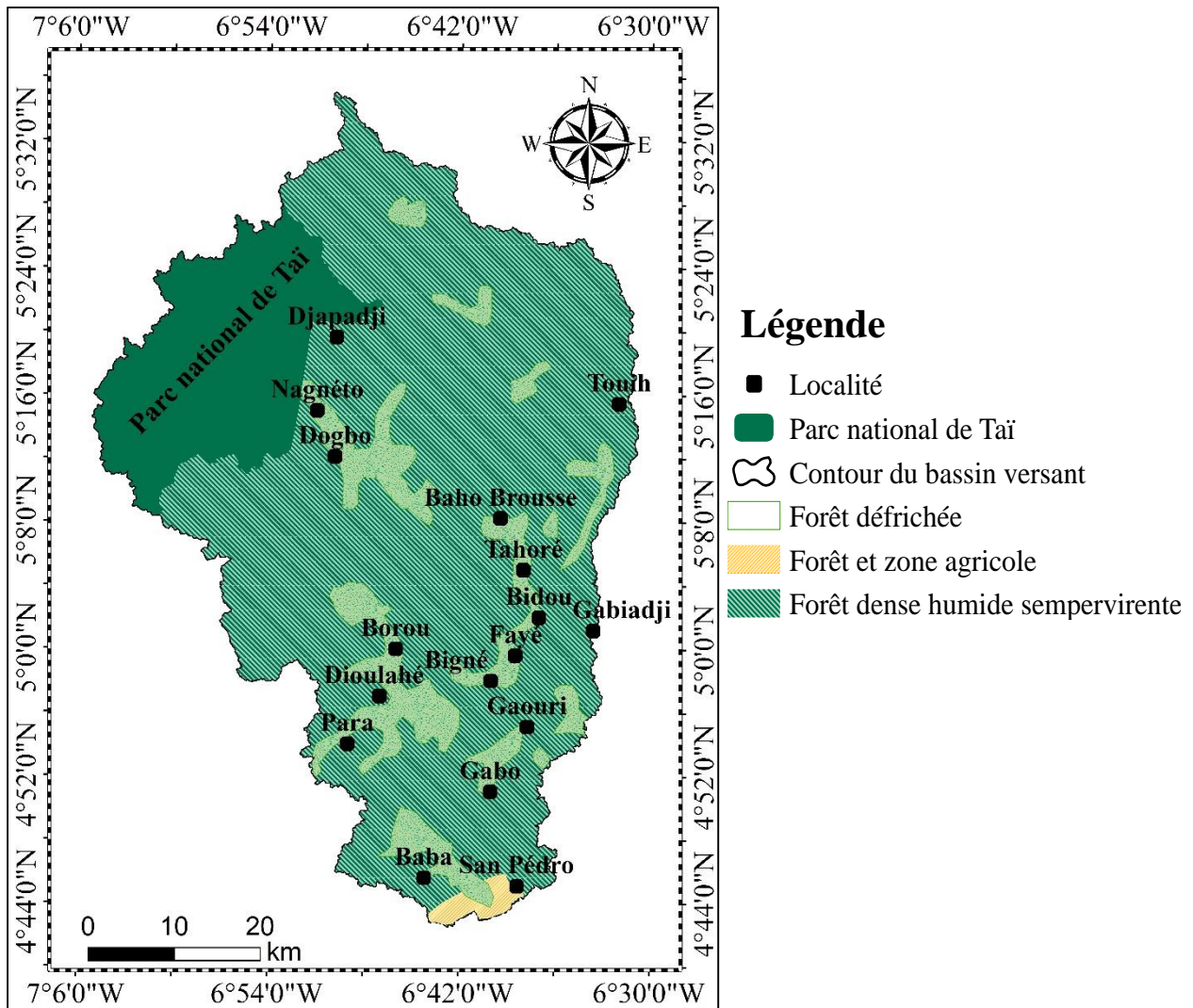


Figure 4 : Carte de la végétation du bassin versant de la rivière San Pedro (IRD, 1979)

1.1.6. Hydrographie

La rivière San Pedro est un cours d'eau côtier situé au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire (figure 5). Avec une dimension réduite, elle a souvent des débits irréguliers et son régime hydrologique est calqué d'assez près sur le régime des pluies du Sud qui les alimentent (Monnier *et al.*, 1974).

Généralités

C'est un régime équatorial de transition caractérisé par deux périodes de hautes eaux correspondant sensiblement aux deux saisons des pluies. La première période des hautes eaux, prédominante, se situe entre Juin-Juillet et la seconde entre Octobre-Novembre. Une période de basses eaux s'observe entre Août-Septembre et une autre, bien plus marquée, s'étend de Décembre à Mars (Fadika, 2012). Le San Pedro est le cours d'eau principal dont les affluents (Palapod, Ménégbé, Kré) augmentent son débit d'écoulement à l'exutoire. En 2001, les chercheurs de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) ont évalué le ruissellement annuel du San Pedro à 336 mm, soit environ 24 % de la pluviométrie annuelle (MINEF, 2003). Dans les derniers kilomètres de son cours, le San Pedro alimente une vaste zone marécageuse comprise entre la rive droite du fleuve et la lagune Digboué. Un barrage hydro-électrique, nommé « Fayé », est construit sur la rivière San Pedro.

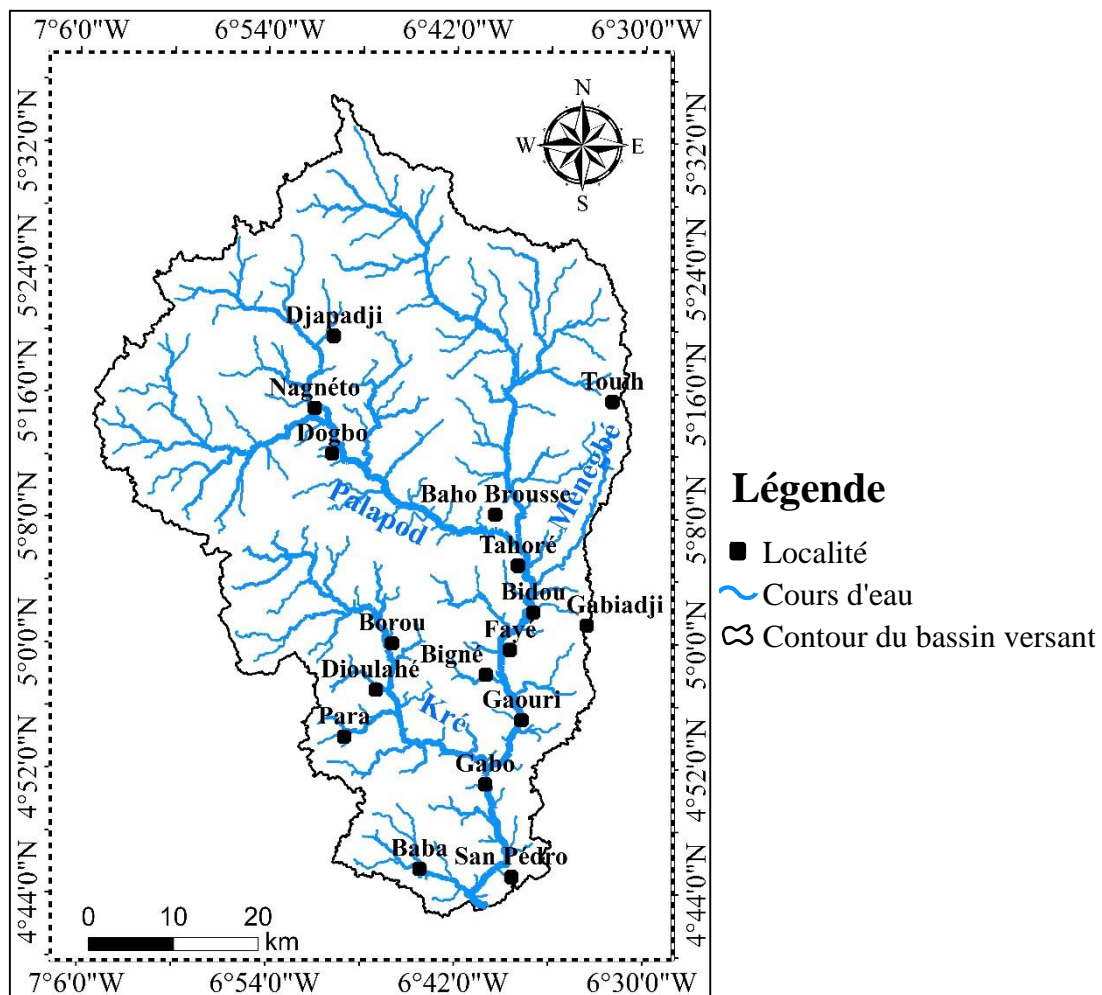


Figure 5 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la rivière San Pedro

1.1.7. Géologie

Les connaissances acquises sur la géologie de la région de San Pedro proviennent des travaux de l'opération domaine Sassandra-Cavally (SASCA) qui se sont déroulés de 1962 à 1968, sous la direction du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et de la Société de Développement Minier de la Côte d'Ivoire (SODEMI) (Papon & Lemarchand, 1973). Le substratum géologique du bassin est dominé par les formations du protérozoïque et du birimien notamment les granodiorites, les granitoïdes, les migmatites et les formations de métamorphisme plus intense ainsi que les formations mésozonales de position stratigraphique incertaine (figure 6).

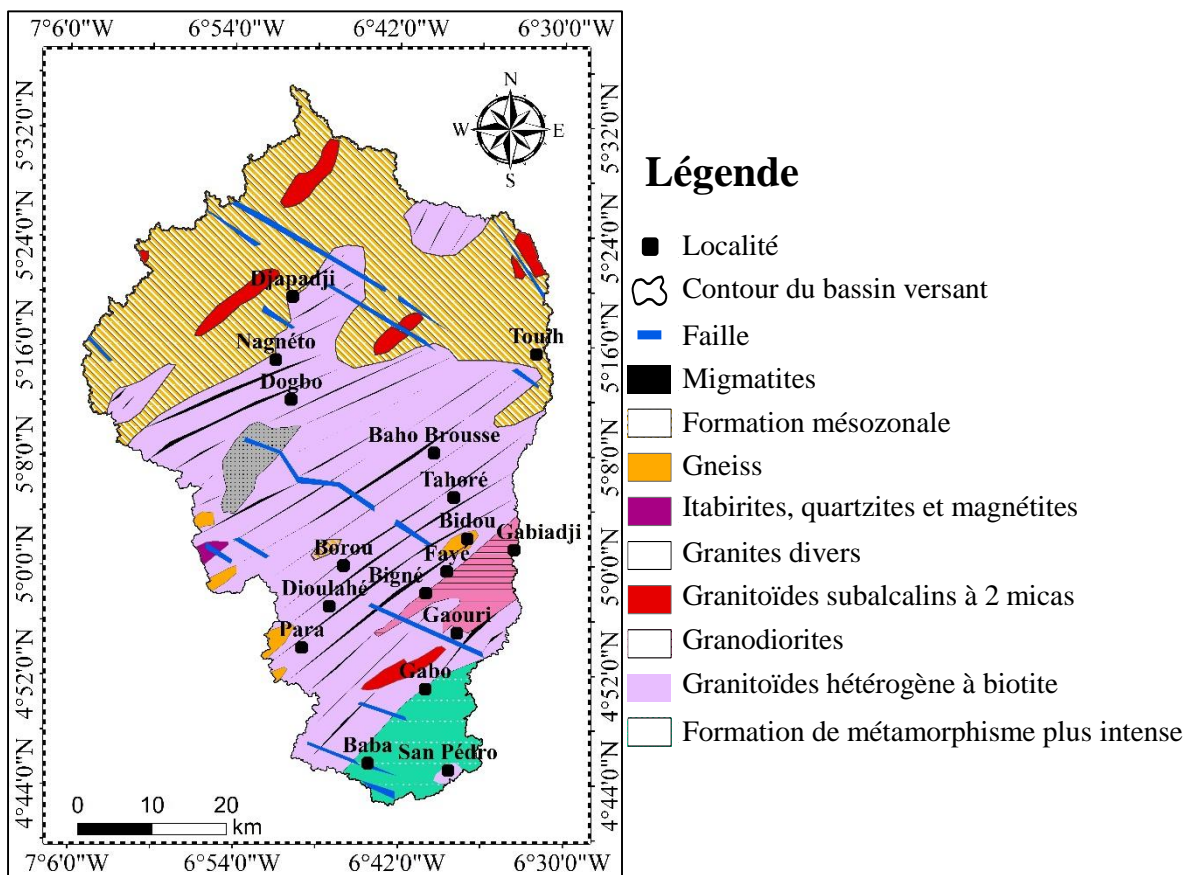


Figure 6 : Carte géologique du bassin versant de la rivière San Pedro (IRD, 1979)

1.1.8. Pédologie

Du point de vue pédologique, le bassin versant de la rivière San Pedro présente des sols en grande partie ferrallitiques fortement désaturés. La désaturation très forte paraît liée à la forte pluviométrie et notamment à celle des mois de Juin et Juillet qui tombent sur un sol déjà humide et déclenchent ainsi les phénomènes de lessivage vertical et oblique (Perraud, 1971). Ces sols sont issus de granites-migmatites ou de micaschistes et gneiss.

Généralités

Cependant, on peut distinguer divers types de sols suivant les différents processus évolutifs déterminés par l'effet des conditions locales du modelé et de la roche mère qui sont :

- les sols remaniés modaux issus de granites et schistes ou de granites seuls. Ces sols sont caractérisés par un horizon gravillonnaire recouvert d'un horizon humifère peu épais, de texture sablo-argileuse ou argilo-sableuse. Le pourcentage d'argile et limon, et la proportion de sables fins par rapport aux sables grossiers sont plus élevés dans les sols issus de schistes que dans les sols issus de granites.
- les sols remaniés faiblement rajeunis. Ils constituent la partie Nord de notre bassin. Ces sols sont caractérisés par la proximité de l'horizon d'altération et sont issus de granites plus ou moins enrichis. Les horizons supérieurs sont de texture argilo-sableuses à argileuse dès la surface.

On trouve aussi des sols ferrallitiques typiques rajeunis, moyennement désaturés, issus de roches basiques. Les horizons supérieurs sont caractérisés par une texture argileuse. Ces sols contiennent peu d'éléments grossiers.

Enfin, les derniers types de sols rencontrés dans cette région sont les sols hydromorphes peu humifères des bas-fonds et les sols hydromorphes organiques des marécages inondables (figure 7) (ORSTOM, 1975).

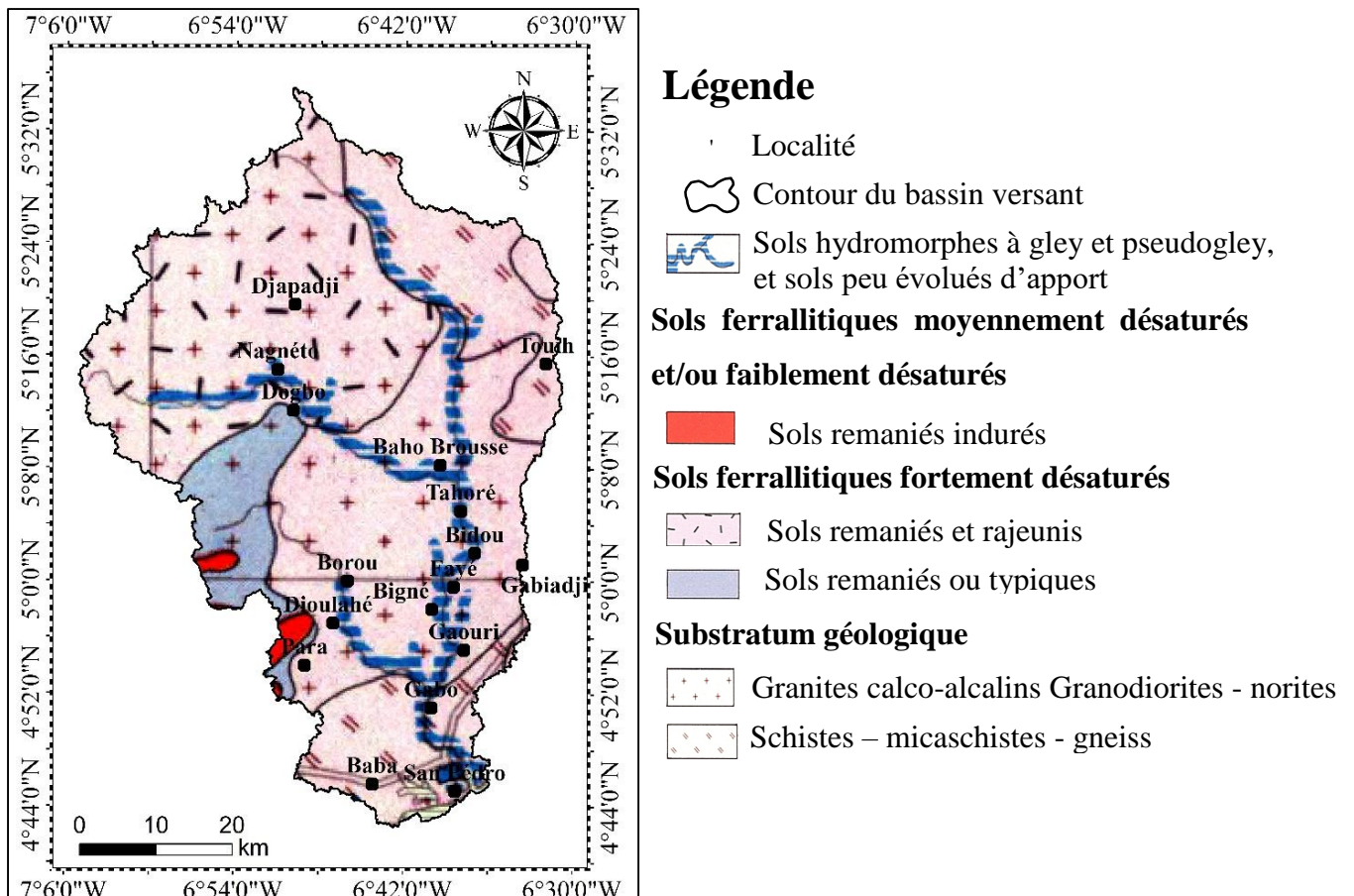


Figure 7 : Carte pédologique du bassin versant de la rivière San Pedro (IRD, 1979)

1.1.9. Situation socio-économique

1.1.9.1. Économie

La région dispose d'un aéroport et d'un port situés dans la ville de San Pedro. Le port, les scieries et les usines assurent l'essor économique de la région faisant d'elle le deuxième pôle économique de la Côte d'Ivoire après Abidjan, devant Bouaké (De Lasmé, 2013). Les plages favorisent les activités de tourisme et loisirs. Les activités principales sont le commerce, l'industrie, la pêche et l'agriculture. Les plantes cultivées sont l'hévéa, le palmier à huile, le cacao et la banane plantain. Les essences forestières exploitées sont l'acajou et l'iroko (De Lasmé, 2013).

1.1.9.2. Population

Le recensement général de la population du département de San Pedro, effectué en 2014, a dénombré 631 156 habitants (RGPH, 2014). Cette population est inégalement répartie sur le département, car elle s'installe majoritairement à proximité des points d'eau naturels et le long des axes routiers. Les populations autochtones sont composées du groupe Krou et Bakwé.

Toutefois, la majorité de la population se compose désormais de ressortissants Akan, de Voltaïques et d'originaires de pays de la sous-région, venus pendant la période de construction du port et du désenclavement régional, et ayant depuis lors procédé à des regroupements familiaux.

1.2. Généralités sur les changements climatiques

1.2.1. Définition des changements climatiques

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

1.2.2. Extrêmes climatiques

1.2.2.1. Définition

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

- basée sur la rareté d'un phénomène climatique, dans ce cas on doit donc considérer sa fréquence d'occurrence ;
- basée sur l'intensité d'un phénomène; ceci implique alors la considération des dépassements d'un seuil par des variables climatiques (par exemple la température, les précipitations, le vent, etc.) associées à ce phénomène ;
- enfin, basée sur la notion d'impact et s'appuyée sur des dégâts socio-économiques causés par un phénomène.

Pour notre étude, nous adopterons la définition proposée par le GIEC (2007) qui stipule qu'un phénomène climatique extrême est un phénomène qui est rare dans le cadre de sa distribution

de référence statistique à un endroit spécifique sur une longue durée, et qui prend en compte que leur fréquence et leur intensité. Selon Abdelnour *et al.* (2005), l'événement climatique extrême ou phénomène climatique extrême représente les queues de distribution qui apparaissent à des échelles spatiales et temporelles différentes. Ici, c'est l'évolution de ces extrêmes du point de vue climatologique qui est ciblée. L'intensité de ces précipitations et températures extrêmes correspond plutôt à un dépassement de seuil (Lionello *et al.*, 2006 ; Boudevillain *et al.*, 2009 ; Colmet-Daage, 2018).

On distingue en outre, les événements extrêmes simples et les événements extrêmes complexes. Alors que les phénomènes climatiques extrêmes simples se décrivent par une seule variable (par exemple, la température ou la précipitation, etc.) qui atteint une certaine valeur, les phénomènes climatiques extrêmes complexes quant à eux impliquent un ensemble de variables associées à un événement climatique particulier. Par exemple, le passage d'un cyclone se caractérise à la fois par des précipitations intenses et un vent violent.

1.2.2.2. Classification des extrêmes climatiques

Les événements climatiques extrêmes constituent l'un des aspects clés du changement climatique. Leurs effets néfastes constituent un grand handicap pour le développement d'un pays (IPCC, 2012), en particulier les pays pauvres. Ils peuvent se manifester de façon exceptionnelle et à fort impact à une échelle régionale ou mondiale. Les variations de la fréquence d'occurrence de ces extrêmes peuvent être beaucoup plus importantes que les variations de la moyenne (Doukpolo, 2014).

- **Vagues de chaleur**

Les vagues de chaleur sont des périodes d'au moins 48 heures au cours desquelles ni la température minimale nocturne ni l'indice de chaleur diurne tombe en dessous des seuils du stress thermique (26,7°C et 40°C) proposés par le National Weather Service (NWS) (Robinson, 2005). Elles ont des conséquences énormes sur l'homme et sur son environnement. Les récents événements, à savoir la canicule en France en 2003, au Niger en 2010 qui ont causé d'énormes pertes en vie humaine en témoignent son impact.

- **Pluies extrêmes**

Elles sont caractérisées par l'apport d'une importante quantité d'eau sur une courte durée (d'une heure à une journée). Cette quantité peut égaler celle reçue habituellement en un mois, voire en plusieurs mois (Salifou, 2020).

- **Sécheresses météorologiques**

Elles correspondent à un déficit prolongé de précipitations sur plusieurs jours et constituent cependant un facteur de nouvelles maladies et d'apparition des nouveaux insectes. L'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) préconise l'utilisation de l'Indice de Précipitations Standardisées (SPI) défini par les auteurs McKee *et al.* (1993, 1995) pour caractériser les types de sécheresse en Afrique tropicale. En effet, le SPI est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs.

- **Sécheresses hydrologiques**

Selon Wilhite & Glantz (1985), les sécheresses hydrologiques, définies comme un déficit en eau sur une période relativement longue (au moins 3 mois), font partie des extrêmes hydrologiques liés à la pluviométrie. Elles se manifestent lorsque les lacs, les rivières ou nappes souterraines montrent des niveaux anormalement bas. Elles peuvent entraîner une baisse de débit des lacs et fleuves. Elles surviennent toujours à la suite d'un déficit des précipitations sur une longue période. L'augmentation de l'évaporation liée à la hausse des températures renforce leurs intensités et leurs durées (ONERC, 2018).

Conclusion partielle

Le bassin versant de la rivière San Pedro se localise dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire où règne un climat de type équatorial de transition à quatre saisons : deux saisons des pluies qui alternent avec deux saisons sèches. Il est caractérisé par un relief peu accentué dont les sommets culminent à 428 m et dominé par les formations du protérozoïque et du birimien recouvertes de sols ferrallitiques fortement désaturés. La végétation dominante est la forêt dense humide. Après la présentation du contexte général de l'étude, nous présentons la deuxième partie consacrée au matériel et méthodes.

DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Matériel

Le matériel utilisé pour cette étude est composé de données et d'outils de traitement des données.

2.1.1. Données

Les données d'étude sont composées des données climatiques et des données hydrométriques.

- **Données climatiques**

Les données climatiques utilisées dans le cadre de cette étude sont les précipitations (P) et les températures maximales (Tmax) et minimales (Tmin) au pas de temps journalier sur la période 1989-2019. Ces données ont été fournies par la Société de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) et concernent la station de San Pedro. Ces données ont permis de calculer les indices climatiques extrêmes.

- **Données hydrométriques**

Ces données concernent les débits journaliers de la rivière San Pedro sur la période 1989-2013. Elles ont été obtenues à la station de Fayé et sont fournies par la Direction de l'Hydrologie. Ces données ont servi à calculer les indices de débits et de mettre en relation les indices de précipitations extrêmes et les indices de débits de la rivière San Pedro.

2.1.2. Outils de traitement des données

Les outils de traitement des données constituent l'ensemble des outils qui nous ont permis d'atteindre nos différents objectifs. Nous avons utilisé :

- le tableur Excel 2016 pour le traitement des données et la réalisation des graphes ;
- le logiciel RCLimDex version 1.0, téléchargeable gratuitement sur le site <http://ccema.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RCLimDex/rclimdex.r>, pour le calcul des indices climatiques extrêmes (Xhang & Yang, 2004) ;
- le logiciel R version 4.1.3, téléchargeable gratuitement sur le site <http://www.r-project.org>, pour les calculs statistiques.

2.2. Méthodes

2.2.1. Caractérisation de la variabilité des paramètres climatiques extrêmes

L'approche méthodologique adoptée dans cette étude pour analyser les événements climatiques extrêmes est basée sur la méthode des indices climatiques (Zhang & Yang, 2004 ; New *et al.*,

2006 ; Aguilar *et al.*, 2009 ; N'Guessan, 2014 ; Hountondji *et al.*, 2011 ; N'Guessan *et al.*, 2018) proposée par l'équipe d'experts sur la détection et les indices des changements climatiques (ETCCDI, 2009). L'avantage d'utiliser ces indices pour la détection des changements climatiques est qu'ils permettent une comparaison facile des tendances entre diverses régions appartenant à des zones climatiques différentes. Aussi, ces indices sont facilement compréhensibles et maniables pour des études d'impacts climatiques sur le plan socio-économique (Christensen *et al.*, 2002).

L'ETCCDI a facilité l'analyse de ces extrêmes climatiques en définissant un ensemble d'indices climatiques et en mettant au point le logiciel RCLimDex qui les calcule. Les paramètres d'entrée de ce logiciel sont :

- la première et la dernière année de la période de base ;
- la latitude et la longitude de la station ;
- le seuil haut et bas des précipitations journalières P (mm).

Les données de sortie sont stockées sous forme de fichiers Excel pour les valeurs des indices et de fichiers images (JPEG) pour les graphiques.

Le logiciel RCLimDex exige un test de contrôle de la qualité des données pour la qualité de l'analyse des indices. Ce contrôle permet d'identifier les erreurs d'enregistrement qui peuvent exister sur des données quotidiennes (WMO, 2009). La procédure est la suivante :

- il faut remplacer les valeurs erronées de la température maximale quotidienne par -99,9, si elle est inférieure à la température minimale quotidienne ;
- il n'est pas possible d'avoir plus de 365 à 366 observations journalières par année ;
- le mois de février ne doit pas avoir plus de 28 observations quelle que soit l'année considérée ;
- les données manquantes ou négatives (pour les précipitations) sont remplacées par -99,9.

L'ETCCDI a défini au total 27 indices pour caractériser les précipitations et les températures extrêmes. Cependant, 14 indices dont 7 pour les précipitations extrêmes et 7 pour les températures ont été calculés dans le cadre de notre étude. Ces indices ont été largement utilisés pour analyser les changements globaux des extrêmes à l'échelle mondiale (Frich *et al.*, 2002 ; Alexander, 2015), en Afrique de l'Ouest (Doukpolo, 2014, Filahi *et al.*, 2015 ; Yapo *et al.*,

2020) et également en Côte d'Ivoire (Balliet *et al.*, 2016 ; Atcheremi *et al.*, 2018 ; Salifou, 2020). Ces indices sont présentés dans les tableaux II et III.

Tableau II : Indices de températures extrêmes (Zhang & Yang, 2004)

| Indices de températures | | | |
|--------------------------------|--|--|--------------|
| Indice | Nom de l'indice | Définition | Unité |
| WSDI | Indicateur des durées des séquences chaudes | Nombre de jours dans l'année avec au moins six jours consécutifs où $T_{max} > 90^{\text{ème}}$ percentile | jour |
| CSDI | Indicateur des durées des séquences fraîches | Nombre de jours dans l'année avec au moins six jours consécutifs où $T_{min} < 10^{\text{ème}}$ percentile | jour |
| DTR | Température diurne | Différence moyenne mensuelle entre TX et TN | °C |
| TXx | Maximum des Tmax | Température maximale la plus élevée dans l'année | °C |
| TNx | Maximum des Tmin | Température maximale la plus basse dans l'année | °C |
| TXn | Minimum des Tmax | Température minimale la plus élevée dans l'année | °C |
| TNn | Minimum des Tmin | Température minimale la plus basse dans l'année | °C |

Tableau III : Indices de précipitations extrêmes (Zhang & Yang, 2004)

| Indices de précipitations | | | |
|----------------------------------|---|--|--------------|
| Indice | Nom de l'indice | Définition | Unité |
| PRCPTOT | Total annuel des précipitations | Précipitations totales annuelles des jours pluvieux ($RR \geq 1,0$ mm) | mm |
| RX1day | Hauteur maximale des précipitations d'un jour | Précipitation totale maximale d'un jour pluvieux | mm |
| RX5day | Cumul maximal des précipitations de 5 jours | Précipitation totale maximale sur 5 jours pluvieux consécutifs pendant l'année | mm |

| | | | |
|-------------|---|--|------|
| R95p | Jours très pluvieux (extrêmement pluvieux) | Précipitation totale annuelle avec précipitation > 95 ^e percentile | mm |
| R99p | Jours très pluvieux (extrêmement pluvieux) | Précipitation totale annuelle avec précipitation > 99 ^e percentile | mm |
| CDD | Jours secs consécutifs | Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières < 1 mm | Jour |
| CWD | Jours pluvieux consécutifs | Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières ≥ 1 mm | Jour |

L'analyse des tendances linéaires (exprimées en % par année) a été réalisée de 1989 à 2019 par régression linéaire entre les différents indices et le temps (en année). Les pentes ainsi estimées ont été regroupées en deux classes indiquant des tendances significatives et non significatives. La limite des deux classes considérées est définie à partir du test statistique de Student utilisé pour tester l'hypothèse d'une pente égale à 0. La tendance est qualifiée comme étant significative si la probabilité p (p-value) du test t appliqué à la pente de régression est inférieure à 0,05. Elle est dite non significative si la probabilité p (p-value) du test t appliqué à la pente de régression est supérieure à 0,05 (Balliet *et al.*, 2016 ; Atcheremi *et al.*, 2018).

2.2.2. Détermination de l'influence des précipitations extrêmes sur l'évolution des débits de la rivière San Pedro

Il s'agit de mettre en évidence l'influence de la tendance des indices de précipitations sur la tendance des indices de débits observés au cours de la période 1989-2013.

2.2.2.1. Calcul de la tendance linéaire des indices de débits

- **Définition des indices hydrologiques**

Étant donné que le calcul des indices hydrologiques n'est pas prévu dans le logiciel (RClimDex), nous avons fait une adaptation afin d'atteindre les objectifs visés par l'étude. La particularité de cette étude réside dans son approche méthodologique qui consiste à définir les indices et à les analyser. Il faut aussi ajouter que contrairement aux travaux antérieurs (Dechemi *et al.*, 2003 ; Touazi *et al.*, 2011 ; Hallouz *et al.*, 2013) qui fondent leurs analyses sur des valeurs mensuelles et interannuelles, cette étude s'intéresse aux données journalières. En effet, les phénomènes d'inondation peuvent bien être journaliers ; c'est-à-dire qu'un cours d'eau n'entre en crue qu'à la suite d'un ou plusieurs jours consécutifs pluvieux. C'est pourquoi toute étude

des crues basée sur des données annuelles et mensuelles ne saurait mettre en évidence les fines modifications survenues sur les débits (Massouangui & Kanga, 2012).

Ainsi, les principaux indices hydrologiques que nous avons définis ne sont que des indices de seuil. Nous avons :

- l'indice du débit le plus faible observé en une journée pendant une année (Fmin1day) ;
- et l'indice du débit le plus fort observé en une journée pendant une année (Fmax1day).

Les indices hydrologiques ont été calculés pendant les années hydrologiques (1er janvier 1989 au 31 décembre 2013). Ces indices sont présentés dans le tableau IV :

Tableau IV : Indices de débits (Programme d'adaptation en Afrique 2008-2012) (Hallouz *et al.*, 2019)

| Indice | Nom | Définition | Unité |
|----------|-----------------------------|---|-------------------|
| Fmin1day | Débit minimum d'une journée | Débit le plus faible observé en une journée pendant une année | m ³ /s |
| Fmax1day | Débit maximum d'une journée | Débit le plus fort observé en une journée pendant une année | m ³ /s |

- **Analyse de la tendance linéaire**

La tendance est l'évolution temporelle d'une variable. Cette notion se rapproche de celle de la tendance en statistique. L'équation 1 de la tendance linéaire est de la forme :

$$y = ax + b \quad (\text{Équation 1})$$

où : a est la pente et b, l'ordonnée à l'origine.

On distingue 3 types de tendance :

- une tendance en hausse si le coefficient directeur (a) est positif ;
- une tendance en baisse si a est négatif ;
- et une tendance neutre lorsqu'on constate une stagnation des variables (a est nul).

2.2.2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique qui facilite l'analyse conjointe d'un grand nombre de données. Elle tient compte de leur caractère multidimensionnel, particulièrement dans le cas d'étude de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques (Ardoin-Bardin, 2004). Cette méthode permet d'identifier les relations de dépendance et les modes de cohérence entre les différentes variables en les regroupant en un nombre limité de variables. En plus, elle a fréquemment été abordée dans de nombreuses études (Ardoin-Bardin, 2004 ; Konan *et al.*, 2013). Par ailleurs, réaliser une ACP revient à remplacer n variables x_1, \dots, x_i corrélées entre elles, par de nouvelles variables c_1, \dots, c_i , appelées composantes principales. Elle se déroule en plusieurs étapes :

➤ **Choix de dimension (nombre q)**

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé deux groupes de variables (G1 et G2). D'abord le premier groupe (G1) est composé des variables de l'indice de débit minimum ($F_{min1day}$) et les indices de précipitations extrêmes. Ensuite, le second groupe (G2) est formé à partir des indices de précipitations extrêmes et de l'indice de débit maximum ($F_{max1day}$). Cette répartition nous permet dans un premier temps, de montrer la corrélation entre les indices de précipitations extrêmes et l'indice des débits minimums d'un jour dans l'année (respectivement l'indice maximum d'un jour dans l'année). Dans un second temps, elle nous permet d'identifier des modes cohérents de variabilité interannuelle pour les variables extrêmes considérées avec les indices de débits.

La qualité des estimations auxquelles conduit l'ACP dépend, de façon évidente, du choix de q , c'est-à-dire du nombre de composantes retenues pour reconstituer les données, ou encore de la dimension du sous-espace de représentation. Il existe plusieurs critères de choix du nombre q dans la littérature. Dans cette étude, nous avons utilisé le critère de Kaiser en ACP. Ce critère consiste à attribuer le même poids à toutes les variables utilisées. Les axes associés à des valeurs propres supérieures à 1 seront considérés comme les composantes principales ou axes principaux (Salifou, 2020).

➤ **Projection des variables et qualité de représentation**

Elle consiste à projeter les informations dans la nouvelle base des axes principaux choisis précédemment dans un cercle de rayon 1. Les coordonnées de chaque variable sont comprises entre -1 et +1 et représentent les coefficients de déterminations (R^2) entre les variables initiales

et les axes principaux. Plus la coordonnée d'une variable est proche de 1, meilleure est sa qualité de représentation (Salifou, 2020).

➤ **Contribution des variables**

Elle permet de déceler les variables les plus influentes et, éventuellement, aberrantes qui participent à la construction de l'axe. Elle représente le carré de la corrélation entre la variable et l'axe divisé par la somme des carrés des corrélations entre les variables et l'axe.

2.2.2.3. Méthode de régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple est une méthode statistique adaptée pour mettre en évidence et évaluer les différentes corrélations entre la variation des indices de débits et les autres variables de précipitations extrêmes. En d'autres termes, elle évalue statistiquement les sources de variations des indices de débits (ΔY) par rapport aux prédicteurs (ΔX_i) choisis (Salifou, 2020). L'évolution des indices de débits (ΔY) de la rivière San Pedro est traduite par l'équation 2 suivante :

$$\Delta Y = \sum_i m_i \Delta X_i + b \quad (\text{Équation 2})$$

où :

- ΔY représente la variation des indices de débits ;
- m_i la sensibilité de la variation des indices de débits (le poids de la régression) par rapport aux variables ΔX_i ;
- ΔX_i représente les variables prédicteurs ;
- b traduit les effets non linéaires potentiels des variables ΔX_i , tels que ceux qui résultent des interactions avec d'autres variables.

Cette équation traduit une estimation utile de premier ordre de la variabilité d'une année sur l'autre de la variation des indices de débits au cours de la période étudiée.

Dans le but d'estimer de façon quantitative le taux de variance entre les indices de débits et les indices de précipitations extrêmes, nous avons défini les tendances statistiquement significatives pour des p-value < 0,10 (Salifou, 2020). Ce seuil est fixé afin de minimiser l'exclusion de tendances possibles là où elles pourraient exister. Cette significativité est évaluée à l'aide du test de Student, recommandé par l'OMM.

Conclusion partielle

Les données disponibles, les méthodes retenues et les outils utilisés pour évaluer l'impact des changements climatiques sur la disponibilité en eau du bassin versant de la rivière San Pedro ont été présentés dans cette deuxième partie. Les indices climatiques extrêmes sont calculés à l'aide du logiciel RClimDex pour caractériser la variabilité des paramètres climatiques extrêmes au cours de la période 1989-2019. Les tests statistiques de corrélation retenus sont appliqués aux indices de précipitations et de débits pour déterminer l'influence des précipitation extrêmes sur les débits. La troisième partie présente les résultats de l'application de ces différentes méthodes suivi de leur discussion.

TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

3.1.1. Caractérisation de la variabilité des paramètres climatiques extrêmes

3.1.1.1. Tendance d'évolution des indices de précipitations extrêmes

- **Indice des totaux annuels des précipitations (PRCPTOT)**

Les valeurs du cumul des précipitations annuelles sont présentées à la figure 8. L'analyse des fluctuations annuelles montre une augmentation de l'indice PRCPTOT de 1989 à 2005 suivie d'une baisse de 2006 à 2019. De façon générale, la tendance est à la hausse sur la période 1989-2019 car la pente est positive (0,738) ; ce qui indique une augmentation de 22,9 mm en 31 ans. Cependant, cette tendance d'évolution est non significative statistiquement puisque la p-value (0,915) est supérieure à 0,05. En outre, les forts cumuls ont été observés en 1989 (2011,9 mm), en 2001 (1867,3 mm), en 2005 (1872,2 mm), en 2010 (1893,1 mm), en 2014 (1888,2 mm) et en 2017 (1836,2 mm). Quant aux faibles cumuls, ils ont été observés en 1990 (801,7 mm), 2015 (936 mm) et 2019 (804,1 mm).

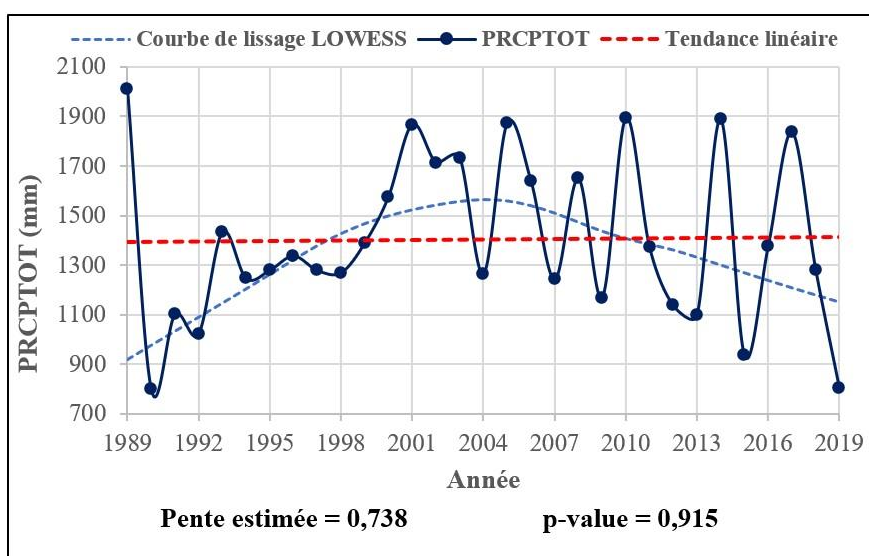


Figure 8 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'indice PRCPTOT à la station de San Pedro sur la période 1989-2019

- **Indices des jours consécutifs humides (CWD) et des jours consécutifs secs (CDD)**

Les valeurs de l'indice des jours consécutifs humides (CWD) à la station de San Pedro sont présentées à la figure 9a. L'analyse montre une baisse de l'indice dans la région de San Pedro puisque le coefficient de pente est négatif. Néanmoins, cette régression n'est pas prononcée (-0,034 jour/an). L'évolution des jours consécutifs humides à la station de San Pedro a baissé de

Résultats et discussion

0,034 jour chaque année de 1989 à 2019, soit une diminution d'environ 1,054 jour sur les 31 années d'étude. Sur cette période d'observation, on constate que l'année 1997 a enregistré le plus de jours consécutifs humides (16 jours) alors que la valeur la plus faible (5 jours) a été observée en 1994, 2007, 2008 et 2010.

Au niveau des jours consécutifs secs (CDD) (figure 9b), le constat est le même. La tendance des fluctuations annuelles est à la baisse (pente égale à $-0,276$). Cette évolution est non significative statistiquement avec une p-value de 0,243 qui est supérieure à 0,05. En outre, c'est l'année 1995 (60 jours) qui a connu une longue séquence de jours consécutifs sans pluie et l'année 2010 (18 jours) qui a connu un faible cumul de jours consécutifs secs sur la période d'étude.

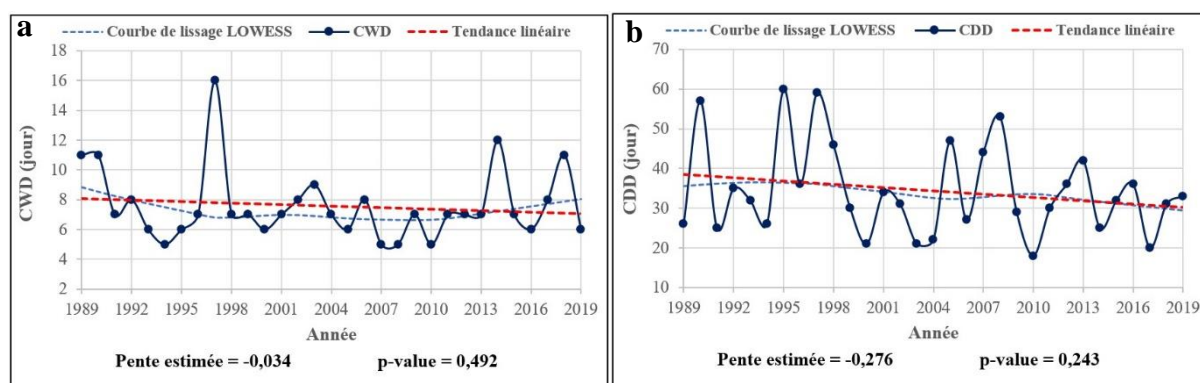


Figure 9 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices CWD (a) et CDD (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019

- **Indices de maximum d'une journée de pluies (RX1day) et du cumul maximal des précipitations de 5 jours (RX5day)**

La figure 10a présente l'évolution des précipitations maximales d'un jour pluvieux. L'analyse montre une tendance à la baisse de l'indice (RX1day) dans la région de San Pedro car le coefficient de pente est négatif ($-0,525$) ; ceci indique une baisse de 0,525 mm chaque année, soit une diminution d'environ 16,3 mm sur les 31 années d'étude. Cette tendance de l'indice est non significative car la p-value est supérieure à 0,05 (p-value égale à 0,408). Par ailleurs, le maximum des précipitations totales maximales d'un jour pluvieux a été mesuré en 2005 pour une hauteur de pluie d'environ 175,2 mm. Quant à la plus faible valeur, elle a été enregistrée en 1990 pour une hauteur de pluie de 59,8 mm.

De même, l'indice de précipitation totale maximale sur cinq jours pluvieux (figure 10b) montre une tendance à la baisse (pente égale à $-1,152$), ce qui correspond à une baisse de 35,7 mm

observée durant les 31 années d'étude. Néanmoins, cette régression est non significative car la p-value (0,434) est supérieure à 0,05. En outre, le maximum du cumul maximal des précipitations de 5 jours a été obtenu en 1997 avec une hauteur de pluie de 394,2 mm contre une valeur faible de 99,6 mm mesurée en 2004.

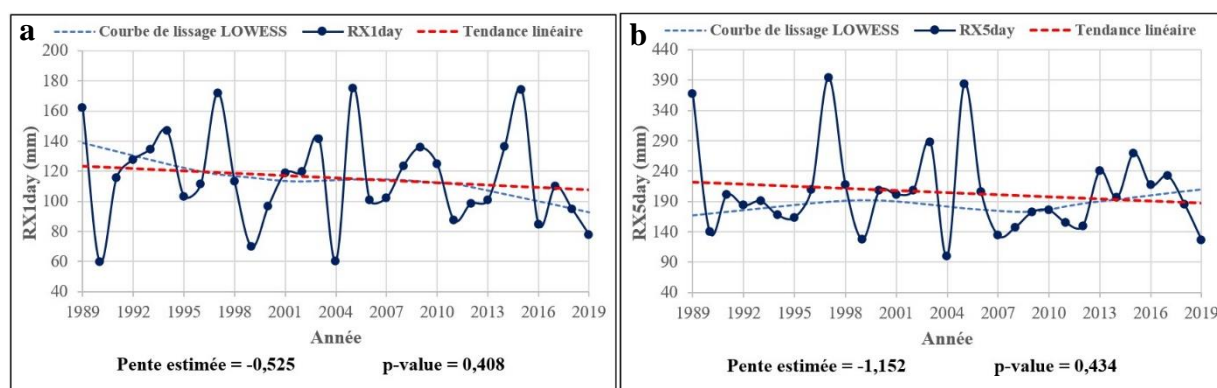


Figure 10 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices RX1day (a) et RX5day (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019

- **Indices de jours très pluvieux (R95p) et de jours extrêmement pluvieux (R99p)**

L'évolution du cumul des précipitations supérieures au percentile 95 (R95p) à la station de San Pedro de 1989 à 2019 est présentée à la figure 11a. L'analyse de la tendance des fluctuations annuelles des jours très pluvieux montre une augmentation de l'indice durant la période 1989-2006 suivie d'une baisse de 2007 à 2019. Cette évolution est non significative statistiquement avec une p-value de 0,985 qui est supérieure à 0,05. L'extrême le plus important est observé en 1989 et le moins important en 1990 avec des hauteurs de pluies respectives de 846,8 mm et 59,8 mm.

L'observation de la figure 11b a permis de constater une baisse des jours extrêmement humides (R99p) (pente égale à -3,111). Cette valeur de la pente indique une baisse de 3,111 mm chaque année, soit une diminution de 96,4 mm en 31 ans. Cette régression est non significative statistiquement car la p-value (0,148) est supérieure à 0,05. En outre, l'année 1989 a connu la plus importante hauteur de pluie (398,9 mm) et les valeurs nulles ont été obtenues en 1990, 1999, 2000, 2004, 2011, 2012, 2016, 2018 et 2019.

Résultats et discussion

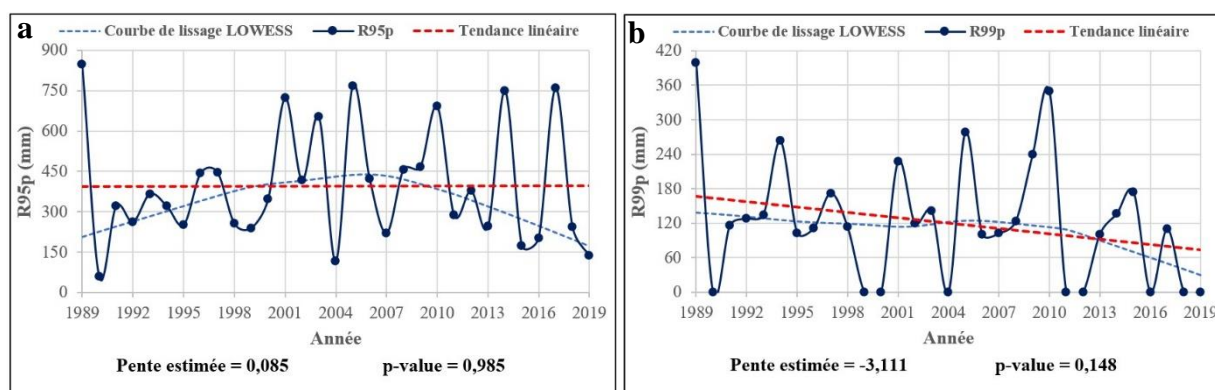


Figure 11 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices R95p (a) et R99p (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019

3.1.1.2. Tendance d'évolution des indices de températures extrêmes

- **Indices des durées des séquences fraîches (CSDI) et des séquences chaudes (WSDI).**

La figure 12a montre l'évolution de l'indice CSDI qui caractérise le nombre annuel de jours froids avec au moins 6 jours consécutifs durant la période d'étude à la station de San Pedro. L'analyse révèle que 5 années sur les 31 années d'étude à savoir 1989, 1990, 1992, 1993 et 2009 présentent au moins 6 jours consécutifs froids. Cependant, un minimum de 6 jours a été observé en 1992, tandis qu'un maximum de 22 jours a été enregistré en 1989. Le coefficient de pente est négatif (-0,315), ce qui montre une tendance à la baisse. Le nombre annuel des jours froids avec au moins 6 jours consécutifs diminue de 0,315 jour chaque année de 1989 à 2019, soit une diminution totale de 9,765 jours sur les 31 années d'étude. Cette évolution est statistiquement significative car la p-value (0,005) est inférieure à 0,05.

Au niveau du nombre annuel de jours chauds avec au moins 6 jours consécutifs (WSDI) (figure 12b), le constat est l'inverse. La fluctuation annuelle de l'indice est à la hausse (pente égale à 0,54) dans la région de San Pedro. La p-value est égale à 0,021 ; par conséquent statistiquement significative car inférieure à 0,05. L'indice révèle que 7 années sur les 31 années d'étude à savoir 1998, 1999, 2011, 2013, 2014, 2015 et 2019 présentent au moins 6 jours consécutifs chauds. Le strict minimum de 6 jours consécutifs chauds a été enregistré en 1999.

Résultats et discussion

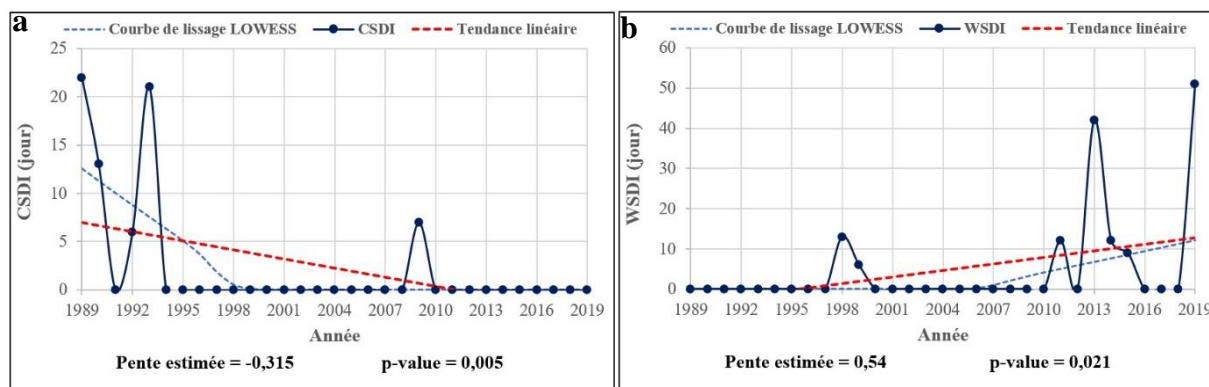


Figure 12 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices CSDI (a) et WSDI (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019

- **Indice des amplitudes thermiques diurnes (DTR)**

Les valeurs des amplitudes thermiques diurnes sont présentées à la figure 13. L'observation des fluctuations annuelles révèle une baisse de l'indice DTR de 1989 à 2004 suivie d'une augmentation de 2005 à 2019. En revanche, cette tendance est non significative du fait que la p-value (0,599) est supérieure à 0,05. Notamment, un maximum de 7,47°C a été enregistré en 2013 et un minimum de 1,17°C en 2008.

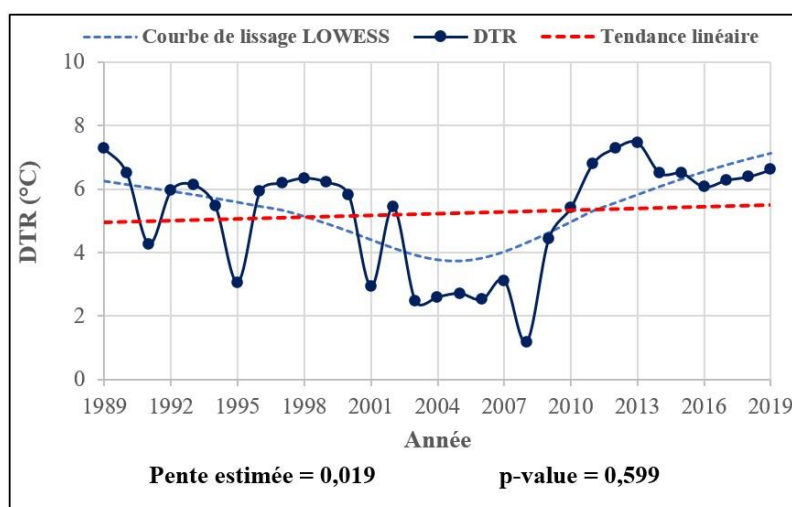


Figure 13 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs de l'indice DTR à la station de San Pedro sur la période 1989-2019

- **Indices de la température maximale la plus élevée (TXx) et la plus faible (TNx)**

La figure 14a montre l'évolution du maximum des températures maximales (TXx) de 1989 à 2019 dans la région de San Pedro. L'analyse montre une baisse de l'indice observé entre 1989 et 2005 suivie d'une hausse de 2006 à 2019. Toutefois, cette tendance est à la hausse car la

Résultats et discussion

la pente (0,02) est positive ; néanmoins non significative statistiquement en raison d'une p-value (0,683) supérieure à 0,05. Par ailleurs, on constate que l'année 1999 a enregistré la plus forte température maximale quotidienne (39,6°C) alors que la valeur la plus faible (28,8°C) a été observée en 2001.

Au niveau du maximum des températures minimales (TNx) (figure 14b), le constat est le même. La tendance des fluctuations annuelles est à la hausse (pente égale à 0,043). Ce coefficient de pente positif indique une augmentation de l'indice TNx de 0,043°C chaque année, soit une hausse de 1,33°C durant les 31 années d'étude. Cette évolution est statistiquement significative car la p-value (0,019) est inférieure à 0,05. En outre, la valeur la plus élevée du maximum des températures minimales (29°C) a été enregistrée respectivement en 2009 et 2011 alors que la valeur la plus faible (25,5°C) a été mesurée durant les années 1989 et 1997.

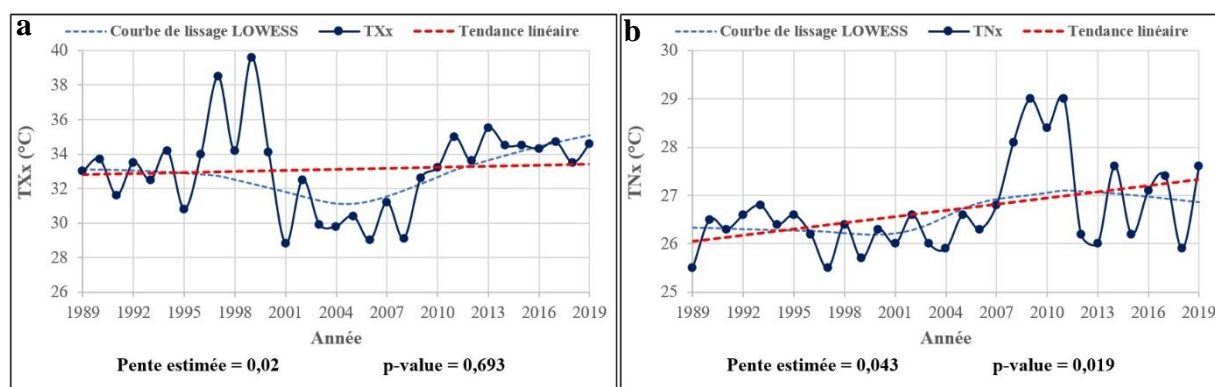


Figure 14 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices TXx (a) et TNx (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019

- **Indices de la température minimale la plus élevée (TXn) et la plus faible (TNn)**

L'évolution des valeurs minimales des températures maximales quotidiennes (TXn) de 1989 à 2019 est présentée à la figure 15a. L'analyse de cette figure montre un maximum de 26,6°C enregistré en 2012 et un minimum de 23,4°C observé en 2004. La pente de la droite est positive et très faible (0,007) ce qui signifie une légère tendance en hausse de 0,007°C chaque année, soit 0,22°C en 31 ans. Cette évolution est non significative comme la p-value de 0,573 est supérieure à 0,05.

L'observation de la figure 15b montre l'évolution des valeurs minimales des températures minimales (TNn) de 1989 à 2019. Cette figure présente une évolution à la hausse de l'indice TNn de 1989 à 2004 suivie d'une baisse de 2005 à 2019 par ailleurs non significative puisque

Résultats et discussion

la p-value (0,141) est supérieure à 0,05. Cependant, l'année 2008 enregistre la plus forte valeur de l'indice (24,1°C) contre 16°C enregistré comme la plus faible valeur en 1989.

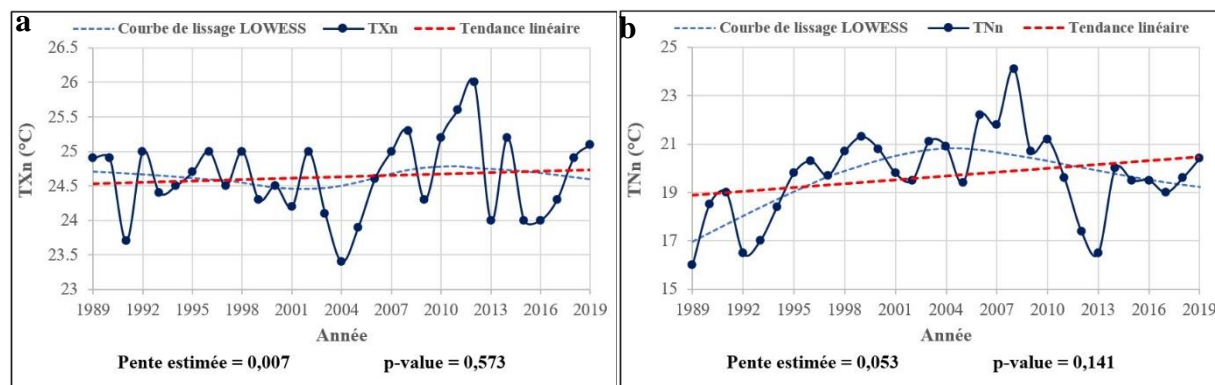


Figure 15 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices TXn (a) et TNn (b) à la station de San Pedro sur la période 1989-2019

Le tableau V résume la tendance et la significativité des 14 indices calculés avec le logiciel RClimDex de 1989 à 2019 à la station de San Pedro.

Tableau V : Coefficients de pente des indices suivant la distribution du test *t*-Student

| Indices | Tendance | p-value |
|-----------------------|---------------|--------------|
| Précipitations | | |
| PRCPTOT | 0,738 | 0,915 |
| CDD | -0,276 | 0,243 |
| CWD | -0,034 | 0,492 |
| RX1day | -0,525 | 0,408 |
| RX5day | -1,152 | 0,434 |
| R95p | 0,085 | 0,985 |
| R99p | -3,111 | 0,148 |
| Températures | | |
| CSDI | -0,315 | 0,005 |
| WSDI | 0,54 | 0,021 |
| DTR | 0,019 | 0,599 |
| TXx | 0,02 | 0,693 |
| TNx | 0,043 | 0,019 |
| TXn | 0,007 | 0,573 |
| TNn | 0,053 | 0,141 |

*En **gras** les tendances significatives

3.1.1.3. Tendence d'évolution de la relation pluie-débit de la rivière San Pedro

- **Variabilité saisonnière de la relation pluie-débit**

L'évolution saisonnière de la relation pluie-débit de la rivière San Pedro est présentée à la figure 16. Il ressort de l'examen de cette figure que le débit annuel moyen de la rivière San Pedro mesuré au niveau de la SAPH est de $20,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit le plus élevé est enregistré au mois de juin ($50,97 \text{ m}^3/\text{s}$) et le plus faible au mois de février ($5,67 \text{ m}^3/\text{s}$). De façon générale, l'analyse montre que la variation des débits et celle des précipitations évolue proportionnellement sur la période d'étude. En effet, les débits et les précipitations présentent un coefficient de corrélation positif et très significatif ($r=0,67$; $p\text{-value}=0,0012$). Avec une moyenne annuelle d'environ 1431 mm , les précipitations mensuelles évoluent entre 23 et $336,9 \text{ mm}$ obtenus respectivement pendant les mois de janvier et juin.

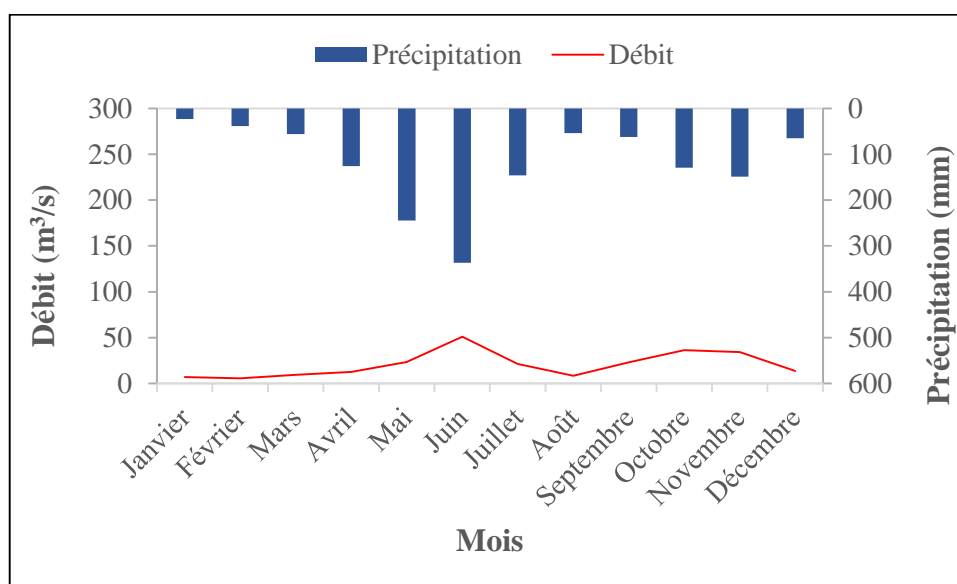


Figure 16 : Évolution mensuelle pluie-débit de la rivière San Pedro de 1989 à 2013

- **Variation interannuelle de la relation pluie-débit de la rivière San Pedro**

La figure 17 présente l'évolution interannuelle de la relation pluie-débit de la rivière San Pedro sur la période allant de 1989 à 2013. L'observation de la fluctuation annuelle des précipitations et des débits montre qu'il existe une bonne corrélation entre les pluies observées et les écoulements enregistrés durant l'année 1989 à 2013 avec un coefficient de corrélation égal à $0,54$. La relation est très significative car la $p\text{-value}$ ($< 2,2\text{E-}16$) est largement inférieure à $0,05$.

Par ailleurs, les débits annuels évoluent entre 10,32 et 35,4 m³/s enregistrés respectivement en 1997 et 2011. L'évolution moyen des débits annuels connaît une tendance à la hausse de 0,545 m³/s chaque année, soit une augmentation de 13,63 m³/s en 25 ans. Cette tendance est statistiquement significative avec une p-value égale à 0,002.

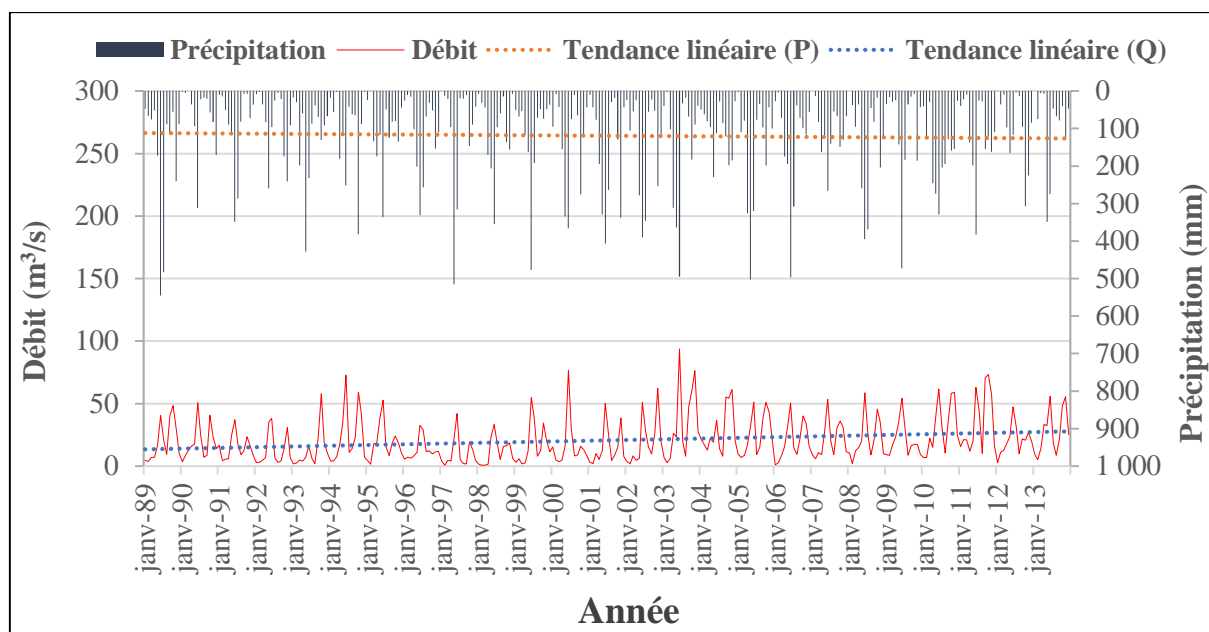


Figure 17 : Évolution interannuelle pluie-débit de San Pedro de 1989 à 2013

3.1.2. Détermination de l'influence des paramètres climatiques extrêmes sur l'évolution des débits de la rivière San Pedro

3.1.2.1. Calcul de la tendance linéaire des indices de débits

- **Évolution de l'indice du débit minimum (Fmin1day) et maximum (Fmax1day)**

La figure 18a présente l'évolution de l'indice de débit minimum journalier (Fmin1day). L'analyse des fluctuations annuelles montre une baisse de l'indice Fmin1day de 1989 à 1998 suivie d'une augmentation de 1999 à 2013. De façon générale, la tendance évolue en hausse sur la période 1989-2013 car la pente est positive (0,047). Ce qui indique une augmentation des débits minimums d'un jour de 0,047 m³/s chaque année, soit une augmentation de 1,18 m³/s en 25 ans. Cependant, cette tendance d'évolution est non significative statistiquement puisque la p-value (0,167) est supérieure à 0,05. La fluctuation de cet indice varie entre 0,28 et 4,02 m³/s enregistré respectivement en 1998 et 2010 avec une moyenne annuelle de 2,16 m³/s.

Quant à la figure 18b, elle montre l'évolution des débits maximums journaliers du 1er janvier 1989 au 31 décembre 2013 de la rivière San Pedro. L'analyse montre un maximum de 229 m³/s

enregistré en 2003 et un minimum de 50,1 m³/s en 1991. Cependant, on observe une augmentation de l'indice Fmax1day de 1989 à 2003 suivie d'une baisse de 2004 à 2013. Cette fluctuation traduit une tendance à la baisse de l'indice dans la région sur la période 1989-2013 car le coefficient de la pente est négatif (-0,373) contrairement à l'indice de débit minimum d'un jour. Cette tendance négative indique une diminution du débit de 0,373 m³/s par année, soit une baisse totale de 9,33 m³/s en 25ans ; néanmoins non significatif statistiquement car la p-value est 0,797.

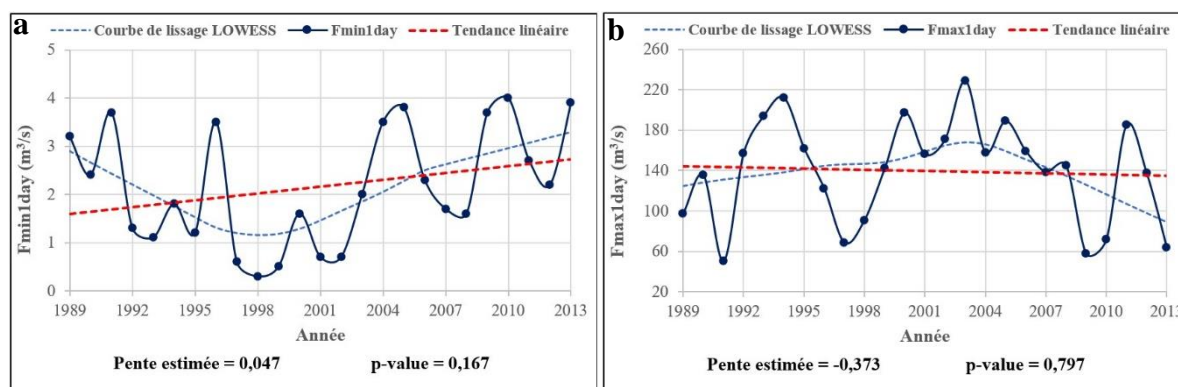


Figure 18 : Variation annuelle et tendance linéaire des valeurs des indices Fmin1day (a) et Fmax1day (b) à la station de Fayé sur la période 1989-2013

3.1.2.2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Les tableaux VI et VII présentent les valeurs propres et le pourcentage de la variance exprimée par chaque axe factoriel des différents groupes de variables. Ces valeurs propres montrent que les Dim1 et Dim2 du groupe de variables G1 représentent 65,93% de l'inertie totale et les valeurs propres associées à ces axes sont supérieures à 1. Par conséquent, les deux axes suffisent pour traduire l'essentiel de l'inertie car les valeurs propres obtenues respectent le critère de Kaiser. Pour le cas du groupe de variables G2, le plan factoriel constitué des axes Dim1 et Dim2 représentent 67,18% de l'inertie totale. De plus, les valeurs propres associées à ce plan factoriel sont supérieures à 1. Ces deux indicateurs montrent que les axes Dim1 et Dim2 sont suffisants pour représenter l'information du groupe de variables G2.

Tableau VI : Valeurs propres et variance des différents axes de G1

| | Dim1 | Dim2 | Dim 3 | Dim4 | Dim5 | Dim6 |
|---------------|--------------|--------------|--------|--------|--------|---------|
| Valeur propre | 2,307 | 1,649 | 0,946 | 0,644 | 0,361 | 0,092 |
| Variance (%) | 38,455 | 27,478 | 15,774 | 10,736 | 6,023 | 1,534 |
| % cumulé | 38,455 | 65,933 | 81,707 | 92,443 | 98,466 | 100,000 |

G1 : Fmin1day, PRCPTOT, CDD, CWD, RX1day et RX5day

Tableau VII : Valeurs propres et variance des différents axes de G2

| | Dim1 | Dim2 | Dim3 | Dim4 | Dim5 | Dim6 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Valeur propre | 2,320 | 1,711 | 0,848 | 0,629 | 0,380 | 0,113 |
| Variance (%) | 38,672 | 28,512 | 14,126 | 10,476 | 6,328 | 1,886 |
| % cumulé | 38,672 | 67,184 | 81,310 | 91,786 | 98,114 | 100,000 |

G2 : Fmax1day, PRCPTOT, CDD, CWD, RX1day et RX5day

▸ **Groupe de variables G1**

Le tableau VIII présente la matrice de corrélation du groupe 1. Il ressort que les valeurs du coefficient de corrélation sont faibles entre l'indice Fmin1day et les indices de précipitations extrêmes. Par ailleurs, l'indice Fmin1day est très faiblement corrélé positivement avec les indices PRCPTOT, RX1day et RX5day et corrélé négativement avec les indices CDD et CWD.

Tableau VIII : Matrice de corrélation G1

| Variable | Fmin1day | PRCPTOT | RX1day | RX5day | CDD | CWD |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Fmin1day | 1 | | | | | |
| PRCPTOT | 0,014 | 1 | | | | |
| RX1day | 0,019 | 0,451 | 1 | | | |
| RX5day | 0,079 | 0,441 | 0,783 | 1 | | |
| CDD | -0,309 | -0,339 | 0,051 | 0,143 | 1 | |
| CWD | -0,164 | -0,100 | 0,232 | 0,568 | 0,284 | 1 |

La figure 19 présente le cercle de corrélation du groupe de variables G1. On remarque que les deux composantes principales expriment 65,93% de l'inertie totale du jeu de données. En projetant les différentes variables sur les deux composantes principales choisies, on constate que les variables Fmin1day ($r = 0,54$; $p\text{-value} = 5,08E-03$) et CDD ($r = 0,81$; $p\text{-value} = 7,941E-07$) sont fortement corrélées avec Dim2 par contre les variables RX1day ($r = 0,87$; $p\text{-value} = 1,805E-08$) et RX5day ($r = 0,96$; $p\text{-value} = 2,681E-14$) sont en bonne corrélation avec Dim1. On déduit donc que l'indice Fmin1day est plus lié à l'indice CDD que les deux autres variables RX1day et RX5day.

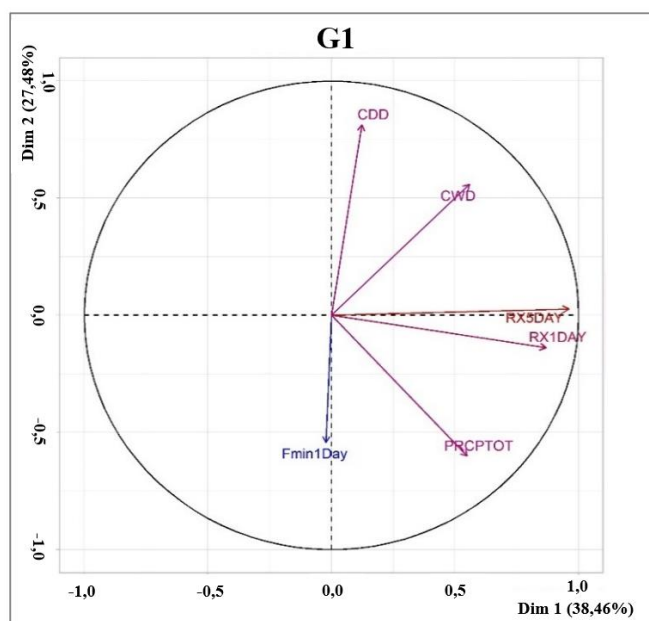


Figure 19 : Cercle de corrélation du groupe de variables G1

▸ **Groupe de variables G2**

Le tableau IX présente la matrice de corrélation du groupe 2. L'analyse montre que les valeurs du coefficient de corrélation sont faibles entre l'indice Fmax1day et les indices de précipitations extrêmes. Par ailleurs, l'indice Fmax1day est très faiblement corrélé positivement avec l'indice PRCPTOT et corrélé négativement avec les indices RX1day, RX5day, CDD et CWD.

Tableau IX : Matrice de corrélation G2

| Variable | Fmax1day | PRCPTOT | RX1day | RX5day | CDD | CWD |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Fmax1day | 1 | | | | | |
| PRCPTOT | 0,246 | 1 | | | | |
| RX1day | -0,046 | 0,451 | 1 | | | |
| RX5day | -0,119 | 0,441 | 0,783 | 1 | | |
| CDD | -0,157 | -0,339 | 0,051 | 0,143 | 1 | |
| CWD | -0,269 | -0,100 | 0,232 | 0,568 | 0,284 | 1 |

Quant à la figure 20, elle présente le cercle de corrélation du groupe de variables 2. L'analyse montre que l'axe 1 (Dim.1) et l'axe 2 (Dim.2) expliquent 67,18% de l'inertie totale avec une contribution estimée à 38,67% pour l'axe 1 et 28,51% pour l'axe 2. Par ailleurs, le cercle de corrélation présenté montre que l'axe principal 2 (Dim.2) est fortement corrélé avec les variables Fmax1day ($r = 0,6$; $p\text{-value} = 1,482E-03$), CDD ($r = 0,69$; $p\text{-value} = 1,41E-04$) et PRCPTOT ($r = 0,73$; $p\text{-value} = 2,937E-05$). Cette analyse permet de déduire que les indices CDD et PRCPTOT sont les plus liés à l'indice Fmax1day que les indices RX1day et RX5day.

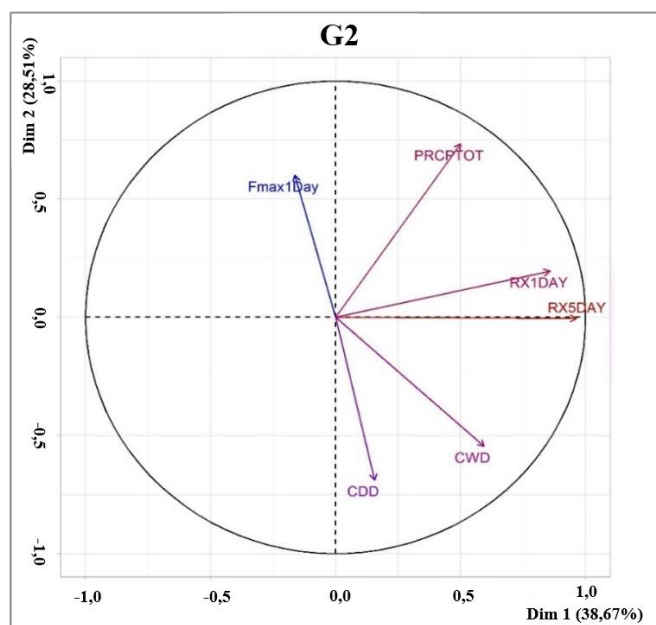


Figure 20 : Cercle de corrélation du groupe de variables G2

3.1.2.3. Approche paramétrique par modèles linéaires

Le tableau X présente les différentes équations utilisées pour modéliser la variabilité des indices de débits à travers les différents indices extrêmes issus de l'ACP. Il ressort de l'analyse de ce tableau que les indices de débits ne sont pas influencés significativement par tous les indices de précipitations extrêmes car leur p-value > 0,1. Les coefficients de détermination entre les indices de précipitations extrêmes et les indices de débits varient de 9,56% pour l'indice Fmin1day et de 2,47% à 6,65% pour l'indice Fmax1day.

Tableau X : Modèles linéaires

| Équations linéaires | R ² | p-value |
|--|----------------|---------|
| Fmin1day = -0,03*CDD + 3,238 | 0,0956 | 0,1325 |
| Fmax1day = 0,04*PRCPTOT + 83,08 | 0,0604 | 0,2362 |
| Fmax1day = -0,64*CDD + 162,347 | 0,0247 | 0,453 |
| Fmax1day = 0,035*PRCPTOT - 0,34*CDD + 101,664 | 0,0665 | 0,469 |

3.2. Discussion

Les résultats de la caractérisation de la variabilité des indices de précipitations extrêmes ont montré qu'il y a eu une augmentation de l'indice des totaux de précipitations (PRCPTOT) et

Résultats et discussion

des jours très pluvieux (R95p) respectivement de 22,9 mm et 2,6 mm. Par contre les indices CWD, CDD, RX1day, RX5day et R99p ont connu une baisse respective de 1,054 jour, 8,556 jours, 16,3 mm, 35,7 mm et 96,4 mm. Ces tendances sont statistiquement non significatives sur la période d'étude allant de 1989 à 2019, ce qui explique le contraste observé dans les résultats. En effet, compte tenu de certains facteurs notamment la pression anthropique sur la végétation, la région du bassin connaît une baisse générale des précipitations totales annuelles comme le montre les fluctuations annuelles de l'indice PRCPTOT à partir de 2006 jusqu'en 2019. En effet, selon CTA (2016), ces baisses de pluies en Côte d'Ivoire seraient causées par la déforestation en cours. Pour rappel, la forêt dense de la Côte d'Ivoire a subi une importante dégradation depuis les années 1960 jusqu'à aujourd'hui. Elle est passée de 13 millions d'hectares à moins de 2 millions d'hectares actuellement (Yao, 2009). Ce résultat de variabilité interannuelle de la pluviométrie moyenne contraste avec celui obtenu par Fadika (2012). L'actualisation des données serait à l'origine de ce contraste. La chronique analysée par cet auteur s'arrête en 2000 contrairement à celle de la présente étude qui se prolonge jusqu'en 2019. Cet auteur a montré que la région de San Pedro connaît une baisse générale des précipitations totales annuelles comme c'est le cas dans d'autres régions de la Côte d'Ivoire notamment à Soubré (Sorokoby, 2013), dans le bassin versant du Haut Bandama à Tortya (Soro, 2014) et dans bon nombre de pays de l'Afrique de l'Ouest (New *et al.*, 2006). Dans leur étude sur l'évolution des conditions climatiques extrêmes quotidiennes couvrant le Sud et l'Ouest de l'Afrique, New *et al.* (2006) ont montré que, globalement, les régions connaissaient une baisse des précipitations totales annuelles (PRCPTOT) et du nombre de jours de pluie. Aguilar *et al.* (2009) dans leur analyse des précipitations de l'Afrique centrale entre 1955 et 2006 sont arrivés aux mêmes conclusions.

Par ailleurs, les résultats de l'évolution des indices de températures ont montré que l'indice CSDI est marqué par une tendance à la baisse très significative de 9,76 jours. Par contre, les indices WSDI, DTR, TXx, TNx, TXn et TNn sont marqués par une tendance à la hausse, ces indices sont la plupart significatifs statistiquement sur la période d'étude. En effet, l'analyse a démontré que le maximum de la température maximale quotidienne (TXx) a augmenté de 0,02°C chaque année, soit une augmentation totale de 0,62°C sur les 31 années d'étude. Quant au maximum de la température minimale quotidienne (TNx), il a augmenté de 0,043°C, soit une augmentation totale de 1,33°C. De même, les indices TXn et TNn ont connu respectivement une augmentation de 0,22°C et 1,64°C au cours de la période 1989-2019. Aussi, au niveau de l'indice d'amplitude thermique diurne (DTR), il connaît une tendance à la hausse de 0,59°C.

Résultats et discussion

Le nombre de jours chaud avec au moins 6 jours consécutifs (WSDI) a augmenté d'environ 17 jours. Par contre, l'indice de la période froide qui renseigne sur le nombre annuel de jours froids avec au moins 6 jours consécutifs (CSDI) a baissé d'environ 10 jours. Il y a eu plus de jours consécutifs chauds (au moins 6 jours consécutifs) que de jours consécutifs froids (au moins 6 jours consécutifs). Donc il y a eu un réchauffement climatique durant cette période.

L'augmentation de la température étant un phénomène planétaire au cours de ces dernières décennies (GIEC, 2014), elle peut être donc imputée à la forte anthropisation et les formes d'occupation des terres, à la déforestation surtout dans le secteur d'étude. En effet, la couverture végétale joue un rôle très important dans la régulation des températures ambiantes de l'atmosphère et de la séquestration du carbone qui atténue le réchauffement climatique (Weissenberger & Silva, 2010). Cette dégradation de la forêt a entraîné des modifications, des perturbations au niveau des cycles hydrologiques, compte tenu du fait que la forêt est l'un des facteurs essentiels qui participe à la création de la pluie. En effet, la forêt favorise l'évapotranspiration qui participe au cycle de l'eau à travers la formation des nuages. Ces changements sont en accord avec les travaux de Péné & Assa (2003), GIEC (2007), Adiaffi (2008) et Assemian *et al.* (2013) qui ont montré une tendance à l'augmentation des températures des régions entre les deux hémisphères de l'ordre de 0,08 °C/10 ans en Afrique de l'Ouest.

Au niveau des débits de la rivière San Pedro, l'analyse de la tendance interannuelle des débits moyens enregistré à la station de Fayé sur la période allant de 1989 à 2013 a montré une tendance à la hausse de 13,63 m³/s en 25 ans. Cette tendance évolue proportionnellement avec la tendance des précipitations moyennes annuelles sur la période 1989-2013. Cette augmentation est aussi ressentie sur de nombreux cours d'eau en Afrique comme le démontrent les travaux de Fadika (2012). Cet auteur a montré que de nombreux cours d'eau en Afrique voient une amélioration de leurs débits dans la décennie 1990. C'est le cas par exemple du N'zo à Kahin sur le bassin du Sassandra de 1994 à 2004 (Goula *et al.*, 2006) mais aussi de 13 autres bassins comprenant en plus du Sassandra, ceux du Sénégal, du Chari à Mailao et de la Gambie à Mako de 1994 à 2000 (Ardoïn-Bardin, 2004).

La rivière San Pedro subit une importante irrégularité de son débit selon les saisons et suivant les années (Fadika, 2012). En outre, le manque de corrélation significative entre les indices de débits et celles des précipitations pourrait s'expliquer par une répartition irrégulière de la durée de la saison pluvieuse et de la saison sèche depuis la source de la rivière San Pedro qui alimente le barrage de Fayé. Aussi, par la non uniformité des données climatiques du bassin enregistrées à la station de San Pedro. Par ailleurs, les coefficients de détermination entre les indices de

Résultats et discussion

précipitations extrêmes et les indices de débits varient de 9,56% pour l'indice $F_{min1day}$ et de 2,47% à 6,65% pour l'indice $F_{max1day}$. Ces coefficients sont non significatifs et indiquent la non dépendance des indices des extrêmes de précipitation sur les indices de débits. Ceci est pourrait être dû au fait que l'évolution temporelle de ces indices n'a pas connu de changement significatif durant la période d'étude. Cependant, l'observation des résultats montre une augmentation des débits minimums d'un jour de $1,18 \text{ m}^3/\text{s}$ et une baisse des débits maximums d'un jour de $9,33 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1989-2013. Ces résultats sont en accord avec ceux de Obahoundje *et al.* (2016). Ils montrent que les changements climatiques et les événements météorologiques extrêmes pourraient avoir des impacts importants et significatifs sur la disponibilité des ressources en eau.

Conclusion partielle

La caractérisation de la variabilité des paramètres climatiques extrêmes a été abordée par le calcul des indices climatiques extrêmes sur la période 1989-2019 à l'aide du logiciel RClimDex. Les résultats des indices de précipitations extrêmes sont non significatifs dont la plupart sont en baisse. Par ailleurs, les indices de températures extrêmes sont en hausse. Une augmentation de l'indice des totaux annuels des précipitations (PRCPTOT) de 22,9 mm a été enregistrée durant ses trois dernières décennies. Les indices du maximum de température maximale (TXx) et minimale (TNx) sont respectivement en hausse de $0,62^\circ\text{C}$ et $1,33^\circ\text{C}$. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) montre que les coefficients de corrélation sont relativement faibles entre les indices $F_{min1day}$ et $F_{max1day}$ et les indices de précipitations extrêmes.

CONCLUSION

Conclusion

Dans cette étude, il est question d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la disponibilité en eau du bassin versant de la rivière San Pedro. Les objectifs spécifiques se déclinent en deux (2) axes. Dans le premier axe, il est question de caractériser la variabilité des paramètres climatiques extrêmes (précipitation et température) du bassin versant de la rivière San Pedro. Le deuxième axe vise à déterminer l'influence des précipitations extrêmes sur l'évolution des débits de la rivière San Pedro. Au terme de cette étude, l'ensemble des résultats obtenus permettent de mettre le point sur les faits suivants :

Selon le contexte climatique du bassin versant de la rivière San Pedro dans ces dernières dizaines d'années (de 1989 à 2019), le maximum de la température minimale quotidienne a significativement augmenté de 1,33°C. Par contre, la température maximale a connu une augmentation non significative de 0,62°C. Ce qui permet de déduire qu'il y'a eu un réchauffement climatique durant cette période. Sur les 31 années d'étude, le nombre de jours froids avec au moins 6 jours consécutifs a baissé d'environ 9,8 jours et l'indice de la période chaude a augmenté de 16,7 jours. Ceci démontre également la présence des épisodes de sécheresse. À noter aussi que l'année 1989 a été la plus pluvieuse avec 2011,9 mm de précipitation totale annuelle tandis que l'année 1990 a été la moins pluvieuse avec 801,7 mm. Les précipitations totales annuelles ont augmenté de 0,915 mm chaque année de 1989 à 2019, soit une augmentation totale de 22,9 mm. Les tendances des indices de précipitations extrêmes sont globalement non significatives. La hausse générale des précipitations s'est répercutée dans le même sens sur l'écoulement de surface de la rivière San Pedro qui voit son débit augmenté de 13,64 m³/s sur la période 1989-2013. Les indices hydrométriques présentent une hausse des débits faibles de 1,18 m³/s et une baisse des débits maximums de 9,33 m³/s. Les indices de débits ne sont pas influencés significativement par les indices de précipitations extrêmes. Ces résultats obtenus confirment la variabilité climatique notée dans le bassin et indiquent la nécessité de faire une analyse complète de l'évolution de l'ensemble des facteurs de l'écoulement notamment la pluviométrie.

Par ailleurs, les résultats obtenus, au cours de cette étude, constituent des fondements et des repères appréciables pour l'aide à la prise de décisions vu l'importance de la rivière San Pedro dans l'alimentation du barrage de Fayé pour la production d'électricité, comme première source d'énergie renouvelable. Sans toutefois oublier le projet d'alimentation en eau potable de la ville de San Pedro à partir du lac de Fayé.

Compte tenu de la complexité de la transformation pluie-débit, nous proposons donc une étude similaire étendue qui prend en compte la modélisation hydrologique à l'aide d'un modèle

Conclusion

distribué pour mieux appréhender la réponse du bassin versant à un événement pluvieux. Et une étude sur l'adéquation entre les besoins en eau des usagers et la disponibilité en eau du lac de Fayé à l'horizon 2040.

RÉFÉRENCES

Références

- Abdelnour R., Bonardet P., Botta A., Enrione D. & Plane G. (2005). Atelier changement climatique : évènements extrêmes et changement climatique, causes, impacts et moyens de lutte, 63 p.
- Adiaffi B. (2008). Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact "socle-bassin sédimentaire" du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud 11, France, 230 p.
- Aguilar A., Aziz B.A., Brunet M., Ekang L., Fernandes A., Massoukina M., Mbah J., Mhanda A, Do Nascimento D.J., Peterson T.C., Thamba U.O., Tomou M. & Zhang X. (2009). Changes in temperature and precipitation extremes in western Central Africa, Guinea Conakry and Zimbabwe, 1955-2006. *Journal of Geophysical Research*, 114 : 148-227.
- Alexander L.V. (2015). Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: a review and update since IPCC AR5. *Weather and Climates Extremes*, 11 : 4-16.
- 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, France, 437 p.
- Assemian E.A., Kouamé K.F., Djangoua E.V., Affian K., Jourda J.P.R., Adja M., Lasm T. & Biémi J. (2013). Étude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide : Cas du département de Bongouanou (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue des Sciences de l'Eau*, 26(3) : 247-261.
- Atcheremi K.N.D., Jourda J.P.R., Saley M.B., Kouamé K.J. & Balliet R. (2018). Study of the evolution of the rainfall extremes and temperature extremes in Davo river basin (south-western of Côte d'Ivoire) from some indices of the software RclimDex. *Journal Larhyss*, 36 : 99-117.
- Balliet R., Saley M.B., Anowa E.E.L., Sorokoby M.V., N'Guessan B.H.V., N'Dri A.O., Djè B.K. & Biémi J. (2016). Évolution des extrêmes pluviométriques dans la région du Gôh (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 12(23) : 74.
- Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S. & Palutikof J.P. (2008). Le changement climatique et l'eau. Document technique iv publié par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, secrétariat du GIEC. Genève, 210 p.

Références

- Beniston M. & Stephenson D. (2004). Les évènements climatiques extrêmes et leur évolution dans les conditions climatiques changeantes. *Changements mondiaux et planétaires*, 44 : 1-9.
- Boudevillain B., Argence S., Claud C., Ducrocq V., Joly B., Joly A., Lambert D., Nuissier O., Plu M. & Ricard D. (2009). Projet Cyprim, partie I : Cyclogenèses et précipitations intenses en région méditerranéenne : origines et caractéristiques. *La météorologie*, 66 : 18-28.
- Christensen J.H., Carter T.R. & Giorgi F. (2002). Prudence employs new methods to assess European climate change, E.O.S. 83, 147 p.
- Colmet-Daage A. (2018). Les impacts du changement climatique sur les pluies et les inondations extrêmes de bassins versants méso-échelles méditerranéens. Thèse de Doctorat, Université Montpellier, France, 240 p.
- CTA (2016). Côte d'Ivoire : La baisse de la pluviométrie affecte la production d'électricité. Programme de radio rurale 03/04. CTA, Wageningen, The Netherlands, 2003. [Online] Available: <https://cgspace.cgiar.org/browse?type=author> (April 19, 2016).
- De Lasme O.Z. (2013). Contribution à une meilleure connaissance des aquifères fissurés du socle précambrien : cas de la région de San Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan (Côte d'Ivoire), 176 p.
- Dechemi N., Benkaci T. & Issolah A. (2003). Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. *Revue des Sciences de l'Eau*, 16(4) : 407-424.
- Doukpolo B. (2014). Changements climatiques et productions agricoles dans l'Ouest de la République Centrafricaine. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 338 p.
- ETCCDI (2009), Climate Change Indices, Definitions of the 27 Core Indices. Retrieved from http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml.
- Fadika V. (2012). Variabilité hydroclimatique et modélisation hydrologique de quelques bassins versants côtiers du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, Abidjan (Côte d'Ivoire), 164 p.

Références

- FAO (2012). Les ressources en eau à l'échelle mondiale. Archives de documents de la Fao. Disponible en ligne : <http://www.fao.org/docrep/005/Y39/8Fly39/8f.htm> (Page consultée le 13 Septembre 2021).
- Filahi S., Tanarhte M., Mouhir L., El Morhit M. & Trambly Y. (2015). Trends in indices of daily temperature and precipitations extremes in Morocco. *Theoretical Applied Climatology*, 124 : 959-972.
- Frich P., Alexander L., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein T.A., & Peterson T. (2002). Observed coherent changes in climate extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19(3) : 193-212.
- GIEC (2007). Bilan des changements climatiques. Rapport de synthèse, 103 p.
- GIEC (2014). Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, Pachauri R.K. et Meyer L.A.] GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- Goula B.T.A., Savané L., Konan B., Fadika, V. & Kouadio G.B. (2006). L'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau des bassins du N'zo et du N'zi en Côte d'Ivoire (Afrique Tropicale humide). *Vertigo*, 7(1) : 1-12.
- Hallouz F., Meddi M. & Mahé G. (2013). Modification du régime hydroclimatique dans le bassin de l'oued Mina (Nord-Ouest d'Algérie). *Journal of Water Science*, 26 : 33-38.
- Hallouz F., Meddi M., Mahé G., Karahacane H. & Ali R.S.E. (2019). Tendances des précipitations et évolution des écoulements dans un cadre de changement climatique : bassin versant de l'oued Mina en Algérie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 32(2) : 83-114.
- Hountondji Y.C., De Longueville F. & Ozer P. (2011). Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. In: Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Environment and Climate Change, 26-27 August 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam, 7 p.
- IPCC (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. a special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 582 p.

Références

- IRD (1979). Atlas de Côte d'Ivoire. 2 mosaics of 3 map sheets and a set of 40 map sheets. Scale of 1:6400000 to 1:10 000. Date of publication : 1967-1979.
- Konan K.S., Kouassi K.L., Konan K.F., Kouamé K.I., Aka K. & Gnakri D. (2013). Évaluation des charges solides et caractérisation hydrochimique des eaux du lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé 1 (Côte d'Ivoire). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 35 : 17-25.
- 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, Côte d'Ivoire, 186 p.
- Kouakou K.E., Goula B.T.A. & Savané I. (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : Cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire - Burkina Faso). *European Journal of Sciences Research*, 16 : 31-43.
- Kouassi A.M. (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 210 p.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Saley M.B. & Biémi J. (2013). Application du modèle de Maillet à l'étude des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Journal of Asian Sciences Research*, 3(2) : 214-228.
- Lionello P., Boscolo R. & Malanotte-Rizzoli P. (2006). In: Mediterranean climate variability. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands. 438 p.
- Luxorion (2010). L'eau dans le monde (I). Disponible en ligne : <http://www.astrosurfcomluxorion!eau-monde.htm> (Page consultée le 13 juin 2010).
- Mahé G., Olivry J-C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F. & Servat E. (2000). Relation eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 330 : 689-692.
- Massouangui K.M. & Kanga A. (2012). Analyse des indices des extrêmes climatiques et hydrologiques en République du Congo de 1950 à 2012. Ministère de l'Économie

Références

- Forestière et du Développement Durable (MEFDD), Programme d'adaptation en Afrique (PPA), Rapport de consultance, Congo, 123 p.
- McKee T.B., Doesken N.J. & Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceeding of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston: 179-186.
- McKee T.B., Doesken N.J. & Kleist J. (1995). Drought monitoring with multiple timescales. *Preprints, 9th Conference on Applied Climatology*, 15-20 January, Dallas, Texas, American Meteorological Society: 233–236.
- MINEF (2003). Gestion intégrée des ressources en eau en Côte d'Ivoire : Bilan et perspectives, Ministère des Eaux et Forêts, République de Côte d'Ivoire, 67 p.
- Monnier Y., Boni D., Hirschberger F., Cotten A. M., Hirschberger A., Berron H., Schmidt M., Coulibaly S., Hauhouot A., FilJeron J-C., Koby A., Arnaud J-C. & Ouata N. (1974). Découverte aérienne de la Côte d'Ivoire. JGT, Editions photoivoire, 220 p.
- N'Guessan Bi V.H. (2014). Modélisation markovienne du champ de précipitations et du mode d'occupation du sol pour une prévision du risque d'inondation à l'aide de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG) : cas du département de Sinfra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire, 194 p.
- N'Guessan Bi V.H., Diedhiou A., Kouadio B.H., Koné A.B., Koffi K., Affian K. (2018). Apport de la télédétection à l'analyse spatio-temporelle du mode d'alternance et d'occurrences des épisodes humides : apport des indices climatiques et chaînes de Markov : cas du district d'Abidjan. Actes du 1er colloque international Nexus Eau Energie Alimentation et Habitat, 12-14 Décembre 2018, Ouagadougou, Burkina Faso, pp 69-80.
- New M., Hewiston B., David B., Tsiga S.A., Kruger A., Manhinsue A., Gomez B., Coelho C.A.S., Masisi D.N., Kalulanga E., Bulane E., Fortunata L., Mdoka M.L. & Lajoie R., (2006). Evidence of trends in daily climate extremes over Southern and West Africa. *Journal of Geophysical Research*, 111 : 1-11.
- Obahoundje S., Ofosu E.A., Akpoti K. & Kobo-bah A.T. (2016). Land use and land cover changes under climate uncertainty: Modelling the impacts on hydropower production in western africa. *Hydrology*, 4(2) : 1-16.

Références

- ONERC (2018). Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement, La documentation Française, Paris, France, 200 p.
- ORSTOM (1975). ORSTOM : rapport d'activités 1972-1973. Paris, France, 261 p.
- Ouédraogo M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 257 p.
- Papon A. & Lemarchand R. (1973). "Géologie et minéralisations du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Synthèse des travaux de l'opération SASCA 1962-1968", *Bulletin de la Direction des mines et de la géologie de Côte-d'Ivoire*, 6 : 3-4.
- Péné C.B. & Assa D.A. (2003). Variations interannuelles de la pluviométrie et de l'alimentation hydrique de la canne à sucre en Côte d'Ivoire. *Sécheresse*, 14 (1) : 43-52.
- Perraud A. (1971). Les sols. *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire, Mémoire ORSTOM*, 50 : 269-391.
- Postel S.L., Daily G.C. & Ehrlich (1996). Human appropriation of renewable fresh water. *Science*, 271(5250) : 785-788.
- RGPH (2014), Rapport d'exécution et présentation des principaux résultats, Institut national de la statistique, 49 p.
- Robinson M. (2005). Precipitation measurement: Gauge Deployment. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, 315 p.
- Salifou I. (2020). Étude des extrêmes climatiques et de leur influence sur la production d'énergie hydroélectrique du barrage de Taabo (Côte d'Ivoire). Mémoire de Master de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, UFR Environnement, Côte d'Ivoire, 56 p.
- Servat E., Paturel J.E., Lubès N.H., Kouamé B., Masson J.M., Travaglio M. & Marieu B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12(2) : 363-387.

Références

- Soro T.D. (2014). Évolution des ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité et de changement climatiques : impacts hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 243 p.
- Sorokoby V.M. (2013). Étude hydrogéologique et hydrologique de Soubré (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique : Apport de la télédétection, de la modélisation hydrologique et des SIG. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 198 p.
- Touazi M., Bhiry N., Laborde J. & Achour F. (2011). Régionalisation des débits moyens mensuels en Algérie du nord. *Journal of Water Science*, 24 : 177-191.
- Vissin E.W. (2007). Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne (France), 285 p.
- Weissenberger S. & Silva D. (2010). L'Amazonie–victime des changements climatiques ? *Revue francobrésilienne de géographie*, 10 : 5-10.
- Wilhite D.A. & Glantz M.H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3) : 111-120.
- WMO (2009). Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation, 52 p.
- Yao A.B., Goula B.T.A., Kouadio Z.A., Kouakou K.E., Kane A. & Sambou S. (2012). Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide. Cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, 19 : 136-157.
- Yao K.T. (2009). Hydrodynamisme dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubré. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 257 p.
- Yapo A.L.M, Diawara A., Kouassi B.K., Yoroba F., Sylla M.B., Kouadio K., Tiémoko D.T., Koné D.I., Akobé E.Y. & Yao K.P.A.T. (2020). Projected changes in extreme

Références

precipitation intensity and dry spell length in Côte d'Ivoire under future climates. *Theoretical and Applied Climatology*, 140 : 871-889.

Zhang X. & Yang F. (2004). RCLimDex (1.0). User Manual. Climate Research Branch Environment Canada, Downsview, Ontario, 23 p.

RÉSUMÉ

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la disponibilité en eau du bassin versant de la rivière San Pedro. Pour ce faire, les indices climatiques extrêmes ont été calculés à l'aide du logiciel RClmDex définis par l'équipe d'Experts sur la Détection des Changements Climatiques et les Indices (ETCCDI). L'analyse de ces indices a révélé une augmentation de l'indice PRCPTOT de 22,878 mm de 1989 à 2019. Les indices TNx et TXx ont augmenté respectivement de 1,33°C et 0,62°C. Par ailleurs, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a démontré que l'indice Fmax1day est faiblement corrélé avec l'indice PRCPTOT et corrélé négativement avec les autres indices de précipitations extrêmes. Par contre, les indices CDD et CWD sont corrélés négativement avec l'indice Fmin1day. Aussi, la fréquence des jours avec des forts débits a diminué alors que celle avec des faibles débits a augmenté. Enfin, la baisse de pluies et l'augmentation de la température ont généré une diminution des ressources en eau.

Mot clés : extrêmes climatiques, disponibilité en eau, ACP, San Pedro.

ABSTRACT

The objective of this study is to assess the impact of climate change on water availability in the San Pedro River watershed. To do this, extreme climate indices were calculated using the RclmDex software defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). Analysis of these indices revealed an increase in the PRCPTOT index of 22.878 mm from 1989 to 2019. The TNx and TXx indices increased by 1.33°C and 0.62°C, respectively. Furthermore, Principal Component Analysis (PCA) showed that the Fmax1day index is weakly correlated with the PRCPTOT index and negatively correlated with the other extreme precipitation indices. On the other hand, the CDD and CWD indices are negatively correlated with the Fmin1day index. Also, the frequency of days with high flows decreased while that with low flows increased. Finally, the decrease in rainfall and the increase in temperature have generated a decrease in water resources.

Key words: climate extremes, water availability, PCA.