



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 : 0453/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI 0416008359

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**IMPACTS DE LA VARIATION DES EXTRÊMES
CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTION DE LA CANNE
À SUCRE DANS LES COMPLEXES SUCRIERS DE
FERKESSÉDOUGOU (NORD DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

ABOUANOU Konan Békanty Aimée

JURY

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

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

**Encadreur : Mme TOURE née YAO Affoué Berthe, Maitre-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa**

**Examineur : M. ANOH Kouao Armand, Maitre-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa**

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 : 0453/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI 0416008359

LABORATOIRE DES
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Génie de l'Eau et de l'Environnement

THEME :

**IMPACTS DE LA VARIATION DES EXTRÊMES
CLIMATIQUES SUR LA PRODUCTION DE LA CANNE
À SUCRE DANS LES COMPLEXES SUCRIERS DE
FERKESSEDGOU (NORD DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

ABOUANOU Konan Békanty Aimée

JURY

- Président** : M. DONGUI Bini Kouamé, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa
- Directeur** : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa
- Encadreur** : Mme TOURE née YAO Affoué Berthe, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa
- Examineur** : M. ANOH Kouao Armand, Maître Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa

Soutenu publiquement

le : 13 / 10 / 2021

DEDICACE

A mon frère cadet **ABOUANOU Konan Jean Louis** pour m'avoir donné la force de tout surmonter.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui, à travers un appui scientifique ou un soutien moral, financier et affectif, ont aidé à réaliser ce mémoire. Je rends grâce à DIEU le Tout Puissant, sans qui rien n'est possible.

Mes remerciements vont à la première responsable de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), Madame **TIDOU Abiba Sanogo Epse KONE**, Professeur Titulaire à UJLoG pour avoir accepté notre inscription en Master de Génie de l'Eau et de l'Environnement (GEE) et pour la formation de qualité dont nous avons bénéficié.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur **KOUASSI Kouakou Lazare**, Professeur Titulaire. Directeur de l'UFR Environnement et par ailleurs Directeur scientifique de ce mémoire qui a bien voulu accepter de coordonner et diriger ces travaux. Merci Monsieur le Directeur, pour votre confiance, pour la bonne gestion de l'UFR Environnement et pour votre détermination à garantir un encadrement de qualité aux étudiants de cette UFR.

Mes remerciements à l'endroit de Monsieur **DIBI Brou**, Maîtres de Conférences, Directeur du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE) pour nous avoir acceptés au sein du laboratoire pour la réalisation de ce travail.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude envers les personnes qui ont contribué à l'amélioration de ce travail. Il s'agit de :

Madame **TOURE née YAO Affoué Berthe**, Maitre-Assistant qui a accepté l'encadrement de ce travail. Nous vous remercions Docteur pour votre disponibilité, votre rigueur et vos critiques pertinentes. Merci infiniment pour votre inestimable soutien scientifique et moral, pour vos précieux conseils et pour votre sympathie. Vous nous avez beaucoup appris. Merci pour tout !

Je voudrais également remercier Monsieur **ANOHI Kouao Armand**, Maitre-Assistant, instructeur de ce mémoire dont la qualité de ses observations a permis d'améliorer ce travail. Merci infiniment pour votre accueil surtout votre disponibilité.

J'exprime également ma gratitude à tous les enseignants de l'UFR Environnement qui ont contribué à notre formation.

Ma profonde reconnaissance va à l'endroit de nos aînés du Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement pour leur aide, leur conseil, leur disponibilité et leurs remarques. Je remercie enfin tous mes amis de promotion (2016-2021), pour leur dynamisme intellectuel et leur soutien moral tout au long de ce travail.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	iii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES	vii
INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : GENERALITES	3
1.1 Description de la zone d'étude	3
1.1.1 Localisation de la zone d'étude.....	3
1.1.2 Géomorphologie	3
1.1.3 Climat.....	4
1.1.4 Réseau hydrographique.....	4
1.1.5 Végétation	5
1.1.6 Sols.....	6
1.1.7 Activités socio- économiques des complexes sucriers de Ferké.....	6
1.2 Généralités sur les changements climatiques	6
1.2.1 Définitions.....	6
1.2.2 Causes du changement climatique	7
1.2.3 Extrêmes climatiques	7
1.2.4 Classification des extrêmes climatiques	8
1.2.5 Analyse régionale du changement climatique	8
1.2.5.1 Indices extrêmes du projet RDSRERE.....	8
1.2.5.2 Indices du groupe ESIDCC	9
1.3 Phénologie de la culture de la canne à sucre	11
1.3.1 Stades agronomiques.....	11
1.3.2 Processus physiologiques.....	12
1.3.3 Cycle végétatif	12
1.3.4 Effet des paramètres climatiques sur l'évolution de la canne	14
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	15
2.1 Matériel.....	15
2.1.1 Données climatiques	15
2.1.2 Données de productions	15
2.1.3 Outils.....	15

2.2 Méthodes	16
2.2.1 Redéfinition de la saison agricole de la canne à sucre dans les complexes sucriers.....	16
2.2.1.1 Identification de la date de démarrage et de fin de la saison des pluies.....	16
2.2.1.2 Définition de la longueur de la saison des pluies	16
2.2.1.3 Détermination des séquences sèches	17
2.2.2 Caractérisation de la variation des extrêmes climatiques	17
2.2.3 Détermination de la corrélation entre la variation des extrêmes climatiques et la production de la canne à sucre	19
2.2.3.1 Calcul du rendement.....	19
2.2.3.2 Analyse en Composante Principale (ACP)	19
2.2.3.3 Régression linéaire multiple.....	20
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	21
3.1 Resultats.....	21
3.1.1 Redéfinition de la saison agricole dans les complexes de Ferké	21
3.1.1.1 Dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse	21
3.1.1.2 Durée de la saison pluvieuse	21
3.1.1.3 Analyse des séquences sèches	23
3.1.2 Caractéristique de la variabilité des extrêmes climatiques à la station de Ferké	24
3.1.3 Corrélation entre la variation des extrêmes climatiques et la production de la canne à sucre	28
3.1.3.1 Relation entre le rendement de la canne à sucre et la pluviométrie	28
3.1.3.2 Analyse statistique de la relation paramètres climatiques extrêmes-rendement de la canne à sucres	30
3.2 Discusion	34
CONCLUSION	38
REFERENCES.....	40

LISTE DES ABREVIATIONS

AEP	: Alimentation en Eau Potable
AFD	: Agence Française de Développement
CCNUCC	: Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CLIMSUCAF	: Services Climatiques et Météorologies pour la production l'exploitation de la Canne à sucre en Afrique
CLIVAR	: Climate Variability and Predictability
DRD	: Direction Recherche et Développement
DTA	: Direction Technique Agricole
ETCCDMI	: Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices
GIEC	: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GEE	: Génie de l'Eau et de l'Environnement
GES	: Gaz à Effet de Serre
IPCC	: Intergovernmental Panel on climate change
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
LSTE	: Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement
NWS	: National Weather Service
OMM	: Organisation Météorologique Mondiale
PESUF	: Projet Extension au Sud de Ferké 2
STARDEX	: Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions
SMHN	: Services Météorologiques et Hydrométéorologiques Nationaux
SODESUCRE	: Société de Développement de la production Sucrière
SUCAF-CI	: Sucrierie d'Afrique-Côte d'Ivoire
UE-RCI	: Union Européenne-République de Côte d'Ivoire

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Indices climatiques du logiciel RClmDex	10
Tableau II : Equations de base du logiciel Rclimdex pour les indices à déterminer.....	18
Tableau III : Dates de démarrage de la saison sur la période 1989-2018	21
Tableau IV : Dates de fin de la saison sur la période 1989-2018	21
Tableau V : Durées des saisons pluvieuses	22
Tableau VI : Moyennes et quartiles des séquences sèches pendant les saisons des pluies sur la période (1989-2018).....	24
Tableau VII : Rendements calculés à partir des données de production de 2006 à 2019	29
Tableau VIII : Valeurs propre et variance des différents axes G1, G2 et G3.	31
Tableau IX : Corrélation entre le rendement et les indices par la méthode de régression.....	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation des complexes sucriers de Ferkessédougou	3
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de Ferké 2 sur la période 1999-2019	4
Figure 3 : Réseau hydrographique des complexes sucriers de Ferké.....	5
Figure 4 : Différents stades agronomiques de la canne à sucre	11
Figure 5 : Cycle de culture de la canne à sucre.....	13
Figure 6 : Evolution interannuelle de la longueur de la saison des pluies	23
Figure 7 : Tendances des indices de précipitations extrêmes calculées sur la période 1989-2018 à la station de Ferké	25
Figure 8 : Variation interannuelle des valeurs des indices.....	26
Figure 9 : Tendances des indices de températures extrêmes de 1989-2018.....	27
Figure 10 : Tendances des indices de températures extrêmes sur la période 1989-2018.....	28
Figure 11 : Evolution du rendement agricole de la canne à sucre en fonction de la pluviométrie lors des campagnes à Ferkessédougou entre 2006 et 2018.	30
Figure 12 : Cercles de corrélation de groupes de variables G1.....	32
Figure 13 : Cercles de corrélation de groupes de variables G2.....	32
Figure 14 : Cercle de corrélation du groupe de variable G3	33

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Depuis la fin des années 1960, la Côte d'Ivoire, comme l'ensemble des pays de l'Afrique de l'Ouest et Centrale, connaît une aggravation de la variabilité climatique qui se manifeste, en particulier par une modification des variables climatiques (Brou *et al.*, 2005). Considéré comme une menace pour la productivité agricole, les changements climatiques provoquent des situations paradoxales partout où ils se manifestent. Ce sont entre autres : la sécheresse, la désertification, les inondations, les tempêtes, la réduction du couvert végétal et la disparition des sources d'approvisionnement en eau (Boko & Brama, 2016). Par définition, les variables climatiques sont qualifiées d'extrêmes lorsqu'elles prennent une valeur située au-dessus (ou en-dessous) d'un seuil proche de la limite supérieure (ou inférieure) de la plage des valeurs observées pour cette variable. Ces événements extrêmes résultent de l'accumulation de plusieurs autres événements météorologiques (extrêmes ou non) (ONERC, 2018). Cette variabilité des extrêmes climatiques se manifeste trop souvent par des déséquilibres écologiques importants tels que la disparition de certaines espèces végétales et la perturbation de l'activité photosynthétique (Bernard, 2010). Les conséquences ainsi engendrées sont particulièrement inquiétantes dans le cas de l'Afrique de l'Ouest. En effet, ses Etats sont vulnérables à cause de leurs économies reposant essentiellement sur les activités agro-pastorales et sont tributaires des pluies (GIEC, 2011).

En Côte d'Ivoire, les précipitations représentent l'élément climatique fondamental qui conditionne le développement des différentes activités socio-économiques. Leur absence, rareté, excès ou mauvaise répartition spatio-temporelle sont générateurs des crises (Péné & Assa, 2003). Les complexes sucriers situés dans les départements de Ferkessédougou et de Tafiré, au Nord de la Côte d'Ivoire ont en permanence besoins d'eau pour leurs fonctionnements. Ces complexes exploitent par conséquent les eaux du fleuve Bandama pour la pratique de l'irrigation de la canne à sucre, la fabrication du sucre de canne et les besoins domestiques. Les études sur la variabilité climatique effectuées dans la zone ont montré une baisse généralisée des précipitations et une hausse de la température moyenne (Kouassi *et al.*, 2013 ; Soro *et al.*, 2013 ; Fossou *et al.*, 2015 ; Adiaffi *et al.*, 2016). Ces anomalies pluviométriques et de températures observées sur plusieurs années consécutives se sont répercutées sur les cultures provoquant une baisse considérable des productions agricoles. Malgré d'importants investissements consentis par la SUCAF-CI, le rendement des parcelles pluviales dans les complexes sucriers restent tributaires des aléas climatiques alors que la demande nationale en sucre de la Côte d'Ivoire ne fait que croître. Bien vrai que la canne à sucre est l'une des rares matières premières agricoles pouvant être produite sous

INTRODUCTION

pratiquement tous les climats, la variation des facteurs climatiques n'est pas sans conséquence sur la production de la canne à sucre (Hunsigi, 2012). Ainsi un projet pilote financé par l'Agence Française de Développement (AFD) est en cours d'exécution en vue d'étudier la pertinence de la mise en place de systèmes d'informations climatiques pour le secteur de la canne à sucre en république de Côte d'Ivoire. C'est dans le volet hydrologique de ce projet que s'inscrit notre étude qui a pour thème : « **Impacts de la variation des extrêmes climatiques sur la production de la canne à sucre dans les complexes sucriers de Ferkessédougou (Nord de la Côte d'Ivoire)** ». L'objectif principal de cette étude est de caractériser la variabilité des extrêmes climatiques et leur influence sur la production de la canne à sucre dans les complexes sucriers de Ferkessédougou (SUCAF-CI). Plus spécifiquement il s'agira de :

- ✓ redéfinir la saison agricole dans les complexes sucriers ;
- ✓ caractériser la variation des extrêmes climatiques à la station de Ferkessédougou ;
- ✓ déterminer la relation entre la variation des extrêmes climatiques et la production de la canne à sucre.

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

- la première partie présente les généralités sur la zone d'étude et traite du contexte de l'étude ;
- la deuxième partie expose le matériel et les méthodes utilisés pour mener cette étude ;
- la troisième partie présente les résultats et leur discussion. Ce mémoire s'achève par une conclusion comportant des perspectives de l'étude.

PREMIERE PARTIE :
GENERALITES

1.1 Description de la zone d'étude

1.1.1 Localisation de la zone d'étude

Les complexes sucriers de Ferké sont situés au Nord de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 9°12' et 9°36' Nord et les longitudes 5°12' et 5°24' Ouest avec une altitude moyenne de 325 m. Ils sont limités à l'Ouest par le Bandama ; à l'Est par les départements de Koumbala et Tafieré ; au Sud par la rivière Farakwo et au Nord par le département de Ferkessedougou (Figure1).

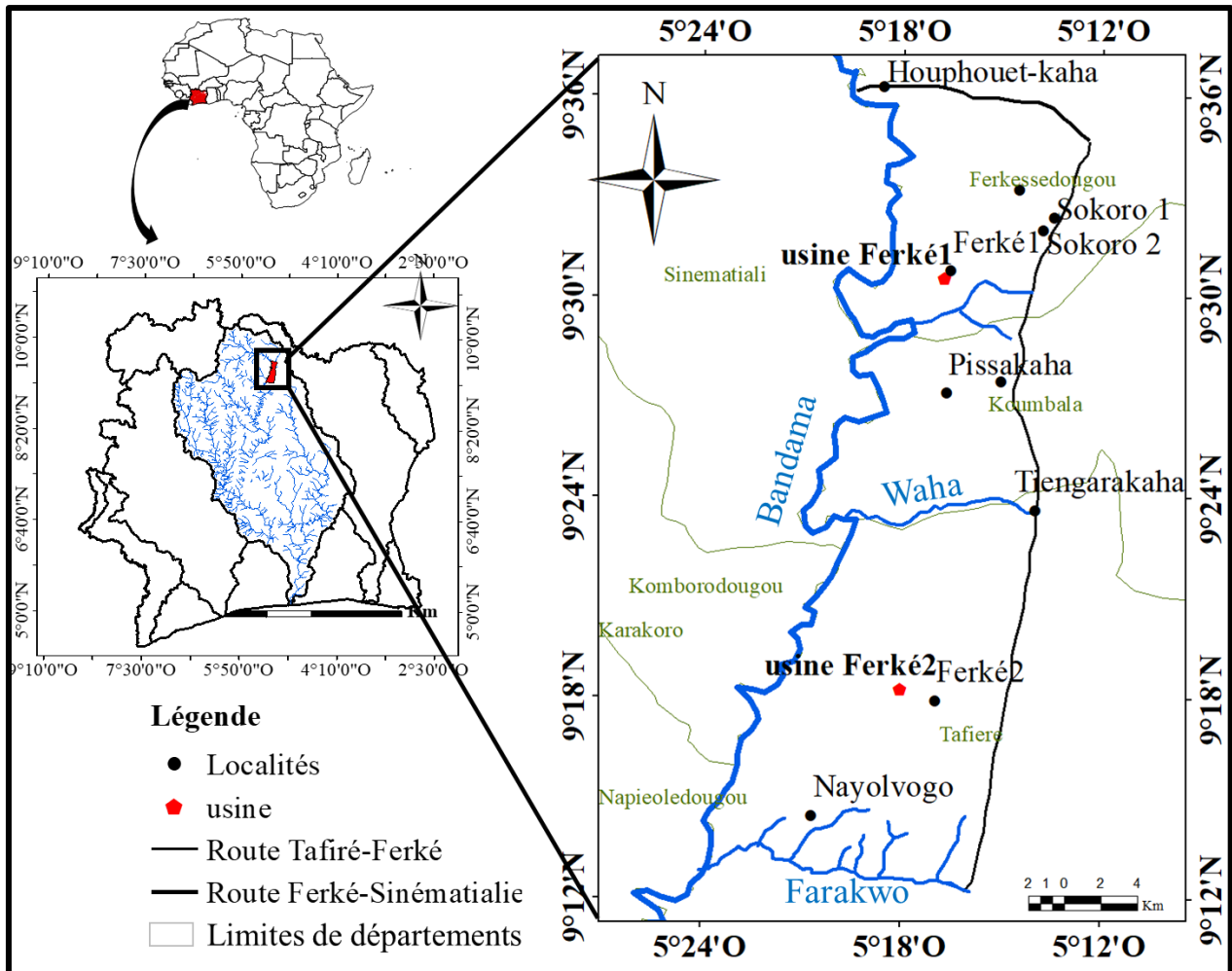


Figure 1 : Localisation des complexes sucriers de Ferkessedougou

1.1.2 Géomorphologie

Le sous-sol des complexes sucriers de Ferké est constitué de roches métamorphiques et ignées du Précambrien (faisant partie du complexe de base où dominent les granites et les gneiss granitiques) (Konan *et al.*, 2017). Du point de vue minéralogique, il y a une dominance de muscovite et de

GENERALITE

biotite. Les granites et les gneiss montrent que le degré de métamorphisme semble avoir été très variable. Ils s'observent selon une bande parallèle au Bandama, mais aussi par endroits dans d'autres secteurs de la zone (Youan Ta, 2008). La topographie des 2 complexes sucriers est ondulée, avec de longues pentes douces dépassant rarement une déclivité de 5 %. Les plateaux de cuirasses constituent l'élément le plus élevé de la séquence.

1.1.3 Climat

Les deux complexes sucriers sont sous l'influence du régime tropical de transition. Ce régime pluviométrique se caractérise par deux grandes saisons (Soro *et al.*, 2013) : une grande saison des pluies et une longue saison sèche :

- une grande saison des pluies, d'avril à octobre avec des précipitations moyennes mensuelles variant de 127,6 à 248 mm ;
- une grande saison sèche, de novembre à mars avec des pluies moyennes variant entre 1,9 et 49 mm. Les températures moyennes mensuelles varient entre 25°C en Août et 29°C en Avril (Figure2).

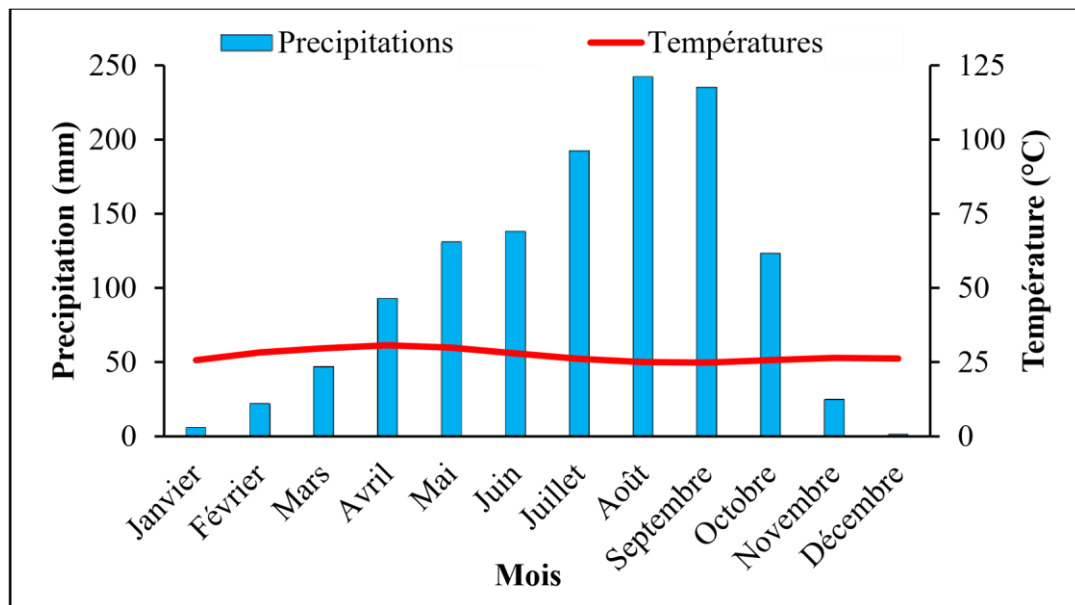


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de Ferké 2 sur la période 1999-2019

1.1.4 Réseau hydrographique

Le Bandama prend sa source dans le Nord de la Côte d'Ivoire, entre les localités de Korhogo et Ferké, à une altitude de 480 m. Il s'écoule d'abord d'Ouest en Est sur près de 200 km, en décrivant

GENERALITE

un arc de cercle autour de Korhogo, puis prend une direction Nord-sud. Dans la partie amont (Figure 3), le Bandama longe les complexes ; lui faisant ainsi bénéficier de ses principaux affluents (Lokpoho, Monongo, Waha, Farakwo). La forme du réseau dans la zone est de type dendritique (Jourda, 2005).

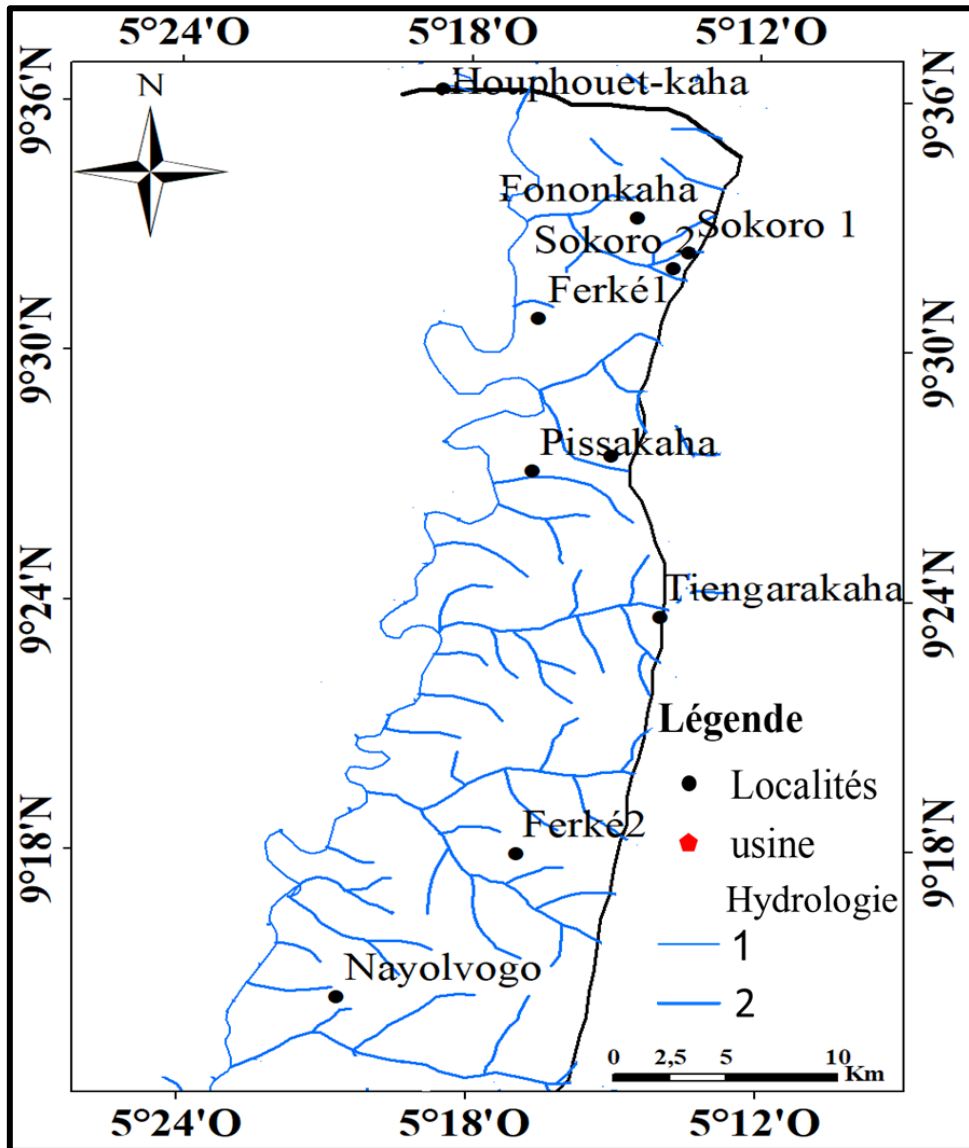


Figure 3 : Réseau hydrographique des complexes sucriers de Ferké

1.1.5 Végétation

En liaison avec la classification climatique, la végétation des complexes sucriers épouse celle de la région de Ferké. Elle est caractérisée par une savane guinéenne (ou sub-soudanaise) boisée, avec des niveaux variables renfermant de petits lambeaux de forêts détachés.

1.1.6 Sols

Le sol en place dans ces parcelles sont de type ferrallitique remanié avec une texture sablo-argileuse de couleur ocre et marqué par une induration latéritique à moyenne profondeur (70 -75 cm). C'est la texture dominante dans les deux périmètres sucriers de Ferké. Sa réserve en eau utile est en moyenne d'environ 90 mm, soit une réserve facilement utilisable de 60 mm (Péné & Koulibaly, 2011). Le sol est majoritairement pauvre en matière organique (1,5 % en moyenne) avec un pH fortement ou faiblement acide (6,0 à 6,5) et une faible capacité d'échange cationique (8 méq/100 g) (Péné *et al*, 2019).

1.1.7 Activités socio- économiques des complexes sucriers de Ferké

La SUCAF-CI a été créée en 1997 à la suite du programme de restructuration et de privatisation du secteur sucrier ivoirien. Elle remplace donc la SODESUCRE (1970-1997) et fait partie du groupe SOMDIAA (Société d'Organisation de Management et de Développement des Industries Alimentaire et Agricole) depuis 2010 qui est chargé de la production et de la commercialisation de la canne à sucre. Elle est composée de deux sucreries (Ferké 1 et Ferké 2) situées à 40 km l'une de l'autre. Les complexes sucriers de Ferkessédougou (Ferké 1 et Ferké 2) ont été construites dans les années 1970 dont l'une est une entreprise américaine Ferké 1 (spécialisée dans la production de sucre blanc) et l'autre une entreprise canadienne Ferké 2 (spécialisée dans la production du sucre roux). La production du sucre de canne provient aussi bien des plantations industrielles (12 000 ha) que des plantations villageoises (2 500 ha). Le sucre produit par la SUCAF-CI est commercialisé sur le marché local sous la marque « Princesse Tatie ».

1.2 Généralités sur les changements climatiques

1.2.1 Définitions

✓ Climat

Le climat est l'ensemble des phénomènes météorologiques qui se produisent en un lieu dans une période donnée (Leroux, 1980). C'est également l'état moyen de l'atmosphère associé à des conditions moyennes dans l'océan, la cryosphère, la végétation etc (Goubanova, 2007). On distingue selon les régions, le climat tropical, le climat sec, le climat tempéré, le climat continental et le climat polaire.

✓ **Changement climatique**

Le mot changement renvoie au processus de modification et de l'évolution. Ainsi, l'expression « changement climatique » peut être comprise comme la modification du climat pendant une longue période d'évolution. La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, 1992) dans son article 1, définit « le changement climatique » comme étant des changements de climat 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.

1.2.2 Causes du changement climatique

Depuis plus d'un siècle, l'homme altère la composition chimique de l'atmosphère en rejetant de façon croissante et ininterrompue des Gaz à Effet de Serre (GES) comme le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), les composés azotés, les gaz fluorés, et des particules comme les aérosols sulfatés (Driouech, 2010). En effet, les GES, naturellement présents dans l'atmosphère, jouent un rôle très important ; car ils contribuent à retenir la chaleur dans les basses couches de l'atmosphère et maintiennent ainsi des conditions propices à la vie sur Terre. Dès l'ère industrielle, les activités humaines dites anthropiques ont provoqué l'augmentation de leurs concentrations dans l'atmosphère et occasionner un déséquilibre du bilan énergétique terrestre (GIEC, 2007 ; GIEC, 2012). Le dioxyde de carbone (CO₂), est le gaz à effet de serre le plus produit par les activités humaines (Tiemoko *et al.*, 2020).

1.2.3 Extrêmes climatiques

Les précipitations et températures extrêmes correspondent 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.

1.2.4 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 (GIEC, 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 tombent en dessous des seuils du stress thermique (26,7°C et 40°C) proposés par le National Weather Service (NWS). Elles ont des conséquences énormes sur l'homme et sur son environnement.

✓ 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.

✓ Tempêtes et cyclones

Les cyclones tropicaux, appelés aussi ouragans (dans l'Atlantique) ou typhons (dans le Pacifique), sont les événements météorologiques de loin les plus dévastateurs, de par leur puissance, et par la population touchée (Cattiaux, 2018).

✓ 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.

1.2.5 Analyse régionale du changement climatique

1.2.5.1 Indices extrêmes du projet RDSRERE

Les indices extrêmes du projet RDSRERE : Réduction d'échelle Dynamique Statistique et Régionale des Extrêmes pour les Régions Européennes (STARDEX) permettent l'analyse des

GENERALITE

tendances récentes des extrêmes sur une grande variété de régions européennes (Frei & Schär, 2001). Sur la base d'analyses approfondies de données observées et de modèles climatiques soutenues par une compréhension des évolutions de la circulation atmosphérique et des processus physiques sous-jacents, STARDEX a démontré de façon convaincante que des changements de température et de précipitations extrêmes spatialement cohérents et dans beaucoup de cas statistiquement significatifs se sont produits et ont eu un impact au cours des 40 dernières années en Europe, et des changements majeurs sont prévus pour l'avenir. Il a aussi montré les incertitudes dans les scénarios régionaux d'extrêmes, dus en partie à la méthode utilisée pour descendre de l'échelle relativement grossière du modèle climatiques global à l'échelle spatiale fine nécessaire pour l'évaluation de nombreux impacts. STARDEX a produit un ensemble de critères d'application, de robustesse et de performance qui permettant d'identifier les méthodes de descente d'échelle les plus appropriées et les plus performantes pour l'évaluation de chaque type particulier d'impacts climatiques.

1.2.5.2 Indices du groupe ESIDCC

Il existe un consensus général au sein de la communauté climatique sur le fait que tout changement dans la fréquence ou la gravité des événements climatiques extrêmes aurait de profonds impacts sur la nature et la société. Il est donc très important d'analyser les événements extrêmes. La surveillance, la détection et l'attribution des changements dans les extrêmes climatiques nécessitent généralement des données de résolution quotidiennes. Cependant, la compilation, la fourniture et la mise à jour d'un ensemble de données quotidiennes en pleine résolution globalement complet et facilement disponible est une tâche très difficile. Cela est dû en partie au fait que tous les Services météorologiques et hydrométéorologiques nationaux (SMHN) n'ont pas la capacité ou le mandat de diffuser librement les données quotidiennes qu'ils collectent. Par conséquent, le groupe de travail VPC : Variabilité et Prévisibilité Climatiques (CLIVAR) du changement climatique ont coordonné un effort international pour développer, calculer et analyser une série d'indices afin que les individus, les pays et les régions puissent calculer les indices exactement de la même manière de sorte que leurs analyses s'intègrent parfaitement dans l'image globale (Karl *et al.*, 1999). Le logiciel RCLimDex, écrit en langage R, fournit une interface graphique conviviale pour calculer un ensemble de 27 indices météorologiques déterminés après un contrôle simple de qualité des données quotidiennes d'entrée. Les indices climatiques, valeurs calculées peuvent être utilisées pour décrire l'état et les changements du système climatiques. Elles permettent d'étudier

GENERALITE

statistiquement les variations des aspects climatologiques dépendantes, telles que l'analyse et la comparaison des séries chronologiques, des moyennes, des extrêmes et tendances. On compte 16 indices liés à la température et 11 aux précipitations. Ils sont regroupés en 5 groupes. Ceux qui sont applicables à nos conditions climatiques sont présentés dans le tableau I.

Tableau I : Les indices climatiques du logiciel RClimDex (Zhang & Yang, 2004)

Identification	Nom de l'indice	Définitions	unité
les indices basés sur les percentiles			
R95p	Jours très pluvieux	Précipitation totale annuelle avec précipitation > 95e percentile	mm
R99p	Jours très pluvieux (extrêmement pluvieux)	Précipitation totale annuelle avec précipitation > 99 ^e percentile	jours
TN10p	Nuits relativement fraîches	Pourcentage des jours avec Tmin < 10 ^{ème} Percentile	%jours
TN90p	Nuits relativement chaudes	Pourcentage des jours avec Tmin > 90eme percentile	%jours
TX10p	Jours relativement frais	Pourcentage des jours avec Tmax < 10 ^{ème} percentile	%jours
TX90p	jours relativement chaudes	Pourcentage des jours avec Tmax > 90eme percentile	%jours
les indices seuils			
R10 (R20)	Nombre de jours de précipitations ≥ 10 mm (20 mm)	Nombre de jours de l'année avec précipitation ≥ 10 mm (20 mm)	jour
les indices absolus			
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 basse dans l'année	°C
TNn	Minimum des Tmin	Minimum des températures minimales dans l'année	°C
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

GENERALITE

les indices de durée			
WSDI	Indicateur des durées des séquences chaudes	Nombre de jours dans l'année avec au moins six jours consécutifs où Tmax > 90e percentile	%jours
CDD	Jours secs consécutifs	Nombre maximal des jours consécutifs avec précipitations journalières < 1 mm	jour
CWD	Jours pluvieux consécutifs	Nombre maximal de jours consécutifs avec des précipitations journalières ≥ 1 mm	jour
CSDI	Indicateur des durées des séquences fraîches	Nombre de jours dans l'année avec au moins six jours consécutifs où Tmin < 10e percentile	%jours
les autres indices			
PRCPTOT	Total annuel des pluies	Précipitations totales annuelles des jours pluvieux (RR ≥ 1,0 mm)	mm
DTR	Amplitude Thermique Diurne	Différence moyenne annuelle entre Tmax et Tmin	°C

1.3 Phénologie de la culture de la canne à sucre

1.3.1 Stades agronomiques

D'un point de vue agronomique, la figure 4 illustre les différents stades.

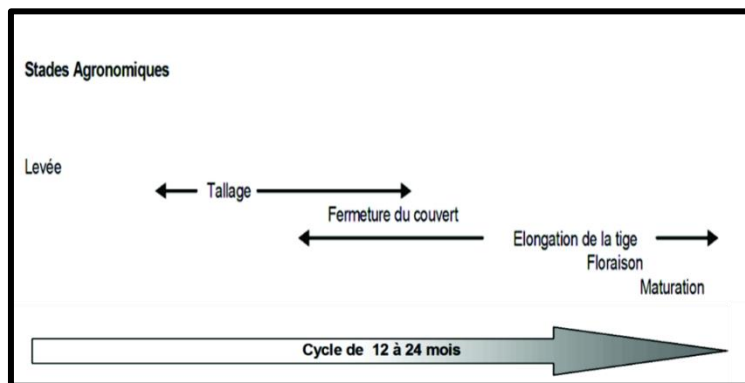


Figure 4 : Différents stades agronomiques de la canne à sucre (Christophe, 2013).

Ce sont entre autres, le stade de :

- levée (débourrement-levée) : grâce aux réserves de la bouture et surtout à l'eau contenue dans le sol qui l'entoure, les bourgeons germent et donnent des tiges, dites primaires, cette tige primaire est elle-même composée d'entrenœuds et de nœuds successifs, d'où partiront,

GENERALITE

de nouvelles racines dites de tige, devant prendre le relai de l'alimentation hydrique et minérale de la tige primaire.

- tallage : les tiges primaires se développent en donnant des tiges secondaires d'où sortiront progressivement leurs propres racines et éventuellement des tiges nouvelles dites tertiaires et ainsi de suite; le tallage se poursuit jusqu'à ce qu'un équilibre se produise, entre le nombre de tiges, leurs divers besoins et les possibilités du milieu.
- élongation : de la tige le bourgeon végétatif terminal de chaque tige donne naissance à une suite de nœuds et d'entrenœuds; les tiges s'allongent, le feuillage prend progressivement son aspect normal. Parallèlement, les racines se ramifient et s'allongent pour supporter cette croissance. Le pas de temps entre l'apparition d'une feuille et de la suivante est de 1 à 3 semaines.
- floraison : à partir d'un certain âge et sous certaines conditions, le bourgeon apical végétatif peut se transformer en bourgeon floral, lequel donnera une inflorescence en deux à trois mois.
- maturation : ce n'est qu'après la floraison qu'elle survient. Ainsi, sous l'influence souvent combinée du froid (même relatif) ou du manque d'eau, le saccharose s'accumule dans les tiges tandis que le glucose, l'acidité et la teneur en eau diminuent. (Christophe, 2013).

1.3.2 Processus physiologiques

Dans son modèle mécaniste de culture, Bezuidenhout (2003) décrit 5 processus consécutifs amenant à l'installation de la couverture végétale de la canne à sucre :

- dormance (Pre-germination) : de la plantation à la levée du premier bourgeon,
- prélevée (Pre-emergence) : de la levée à l'émergence hors du sol de la première tige,
- émission tiges primaires : phase d'émission de la première à la dernière tige primaire,
- émission tiges secondaires : de l'émission de la dernière tige primaire à la sénescence de la première tige,
- sénescence des tiges : de la première sénescence de tige à la récolte

1.3.3 Cycle végétatif

La multiplication de la canne à sucre se fait par boutures. On distingue les phases successives suivantes :

GENERALITE

- phase de reprise : 2 à 4 semaines après la mise en terre des boutures, les premières tiges apparaissent ;
- phase de croissance : elle dure 5 à 7 mois environ. En fin de croissance, la végétation s'arrête et l'inflorescence apparaît. Cette phase a surtout lieu pendant la période de chaleur et de grosses pluies ;
- phase de maturation : dure en moyenne 6 mois après l'arrêt de croissance de la canne, période froide avec de faibles pluies ;
- coupe des cannes vierges : n'a lieu généralement qu'entre les 15 et 18^{ème} mois qui suivent la plantation des boutures. Selon la date de plantation, on peut couper ces cannes vierges entre les 12 et 14 mois qui suivent la plantation. Cette coupe termine le 1^{er} cycle ;
- phases de croissance et de maturation des premières repousses. Elles durent 12 à 14 mois environ après la coupe des cannes vierges ;
- coupe des premières repousses : elle a lieu 2 ans à 30 mois après la mise en place des boutures. Cette coupe termine le second cycle (Maurette, 2011).

Par la suite, la coupe des repousses aura lieu tous les 12 à 13 mois environ. Ainsi le cycle végétatif complet de la canne à sucre peut durer de très nombreuses années si les conditions du milieu sont favorables. Cependant, il n'est pas rentable de conserver indéfiniment les mêmes pieds sur le même terrain. Le cycle cultural ne dure donc que 5 à 7 ans en moyenne. La pullulation des cigales oblige les planteurs à ne dépasser le nombre de 3 à 4 repousses après la récolte des cannes vierges (Figure 5).

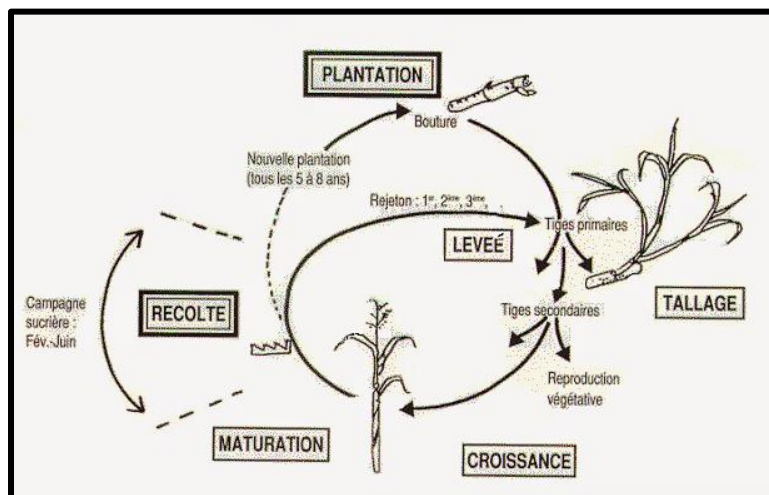


Figure 5 : Cycle de culture de la canne à sucre

1.3.4 Effet des paramètres climatiques sur l'évolution de la canne

Le cycle de la canne, sa croissance et sa maturation sont étroitement conditionnés par le climat. L'eau et la chaleur sont favorables à la croissance tandis que la sécheresse et le froid (surtout nocturne) sont favorables à la maturation. (Christophe, 2013)

➤ Besoins en chaleur

Températures optimales diurnes : pour la germination 26° à 33° et pour la croissance 28° à 35°

Température minimale de croissance : 15°-18°

Température létale : (gelée) 0°

➤ Besoins en eau

Au stade végétatif, la canne a besoin de :

100 à 170 mm par mois de pluie soit 1 000 à 2 000 mm /an pendant les 8 à 9 premiers mois (périodes de croissance);

une saison sèche marquée de 4 à 5 mois correspondant à la période de maturation des cannes.

➤ Besoins en lumière

La canne à sucre exige beaucoup de lumière tant pour sa croissance que pour la formation du saccharose. Les cannes cultivées en pleine lumière ont des tiges plus grosses et plus trapues, des feuilles plus larges, plus épaisses et plus vertes, des racines plus développées. La lumière facilite la maturation des cannes en permettant à l'eau de constitution de se réduire en quantité. La floraison ne peut avoir lieu en présence de lumière.

DEUXIEME PARTIE :
MATERIEL ET METHODES

2.1 MATERIEL

2.1.1 Données climatiques

Pour mener à bien cette étude, des données climatiques observées sur le terrain ont été utilisées. Ce sont entre autres des données de pluie et de température journalières qui s'étendent de 1989 à 2018. Les données ont deux origines, (SUCAF-CI et SODEXAM). Les données provenant de la SUCAF-CI ont été enregistrées à la station météorologique de Ferké 2. Celles provenant de la SODEXAM ont été enregistrées à la station de Korhogo.

2.1.2 Données de productions

Les données de production sont celles des parcelles de cannes à sucre non irriguées ; c'est-à-dire les parcelles à statut pluvial. Ce sont celles des campagnes de 2006 à 2018 du complexe sucrier de Ferké 2.

2.1.3 Outils

L'ensemble des outils qui ont permis d'atteindre les différents objectifs sont :

- ✓ Excel 2016, pour le traitement statistique des données ;
- ✓ Le logiciel R-instat pour la détermination de la date du début et la fin de la saison pluvieuse ;
- ✓ Le logiciel R-Studio, utilisé pour la détermination des corrélations entre les indices climatiques extrêmes et le rendement de la canne à sucre. Ce logiciel s'accompagne d'un programme associé RClimDex, version 1.0, qui permet également le calcul des indices climatiques extrêmes (Zhang Xuelin et Yang Feng, 2004).

2.2 MÉTHODES

2.2.1 Redéfinition de la saison agricole de la canne à sucre dans les complexes sucriers

2.2.1.1 Identification de la date de démarrage et de fin de la saison des pluies

Paramétrage du logiciel R-Instat

Afin de pouvoir déterminer la date de démarrage et fin de la saison pluvieuse, le logiciel a besoin d'un certain nombre d'information. Ainsi après avoir importé les données de température et de précipitation, le paramétrage du logiciel suit les étapes suivantes :

- conversion des données en données numériques ;
- calcul des statistiques (minimale, maximale, moyenne, écart-type, les quartiles) ;
- calcul des sommes et moyennes mensuelles et annuelles des températures et précipitations ;
- fixation des critères pour le calcul de :
 - ✓ la date de démarrage de la saison pluvieuse (DSP). La date de démarrage doit être définie à partir du 1^{er} Avril car les villes de Ferké et Korhogo sont sous un climat unimodal. Cependant, un cumul pluviométrique de 25 mm par jour et moins de sept jours de séquences sèches durant les 30 jours qui suivent la date de démarrage doivent être respectés. Le choix de la période de 30 jours permet de se prémunir contre tout éventuel faux démarrage qui est une contrainte à l'installation et au développement des plantes.
 - ✓ la date de fin de la saison pluvieuse (FSP). Elle doit être calculée sur la base du bilan hydrique (Stern, 2006). La réserve hydrique du sol est fixée à 0,05 mm pour une réserve utile de 70 mm/m et une perte journalière d'évapotranspiration de 4 mm.

2.2.1.2 Définition de la longueur de la saison des pluies

La longueur de la saison est exprimée par la différence entre la date de fin et la date de début de la saison des pluies. Elle se calcule avec l'équation suivante :

$$LSP = FSP - DSP \quad \text{(Equation1)}$$

Avec :

LSP : Longueur de la saison des pluies ;

FSP : date de Fin de la saison des pluies ;

DSP : Date de début de la saison des pluies.

2.2.1.3 Détermination des séquences sèches

Les séquences sèches les plus longues ont été calculées à partir des données journalières de pluie. Ces séquences sèches sont des séries de jours consécutifs sans pluie ou avec des pluies de hauteurs inférieures à 0,85 mm. Il y a sécheresse saisonnière lorsqu'il y a un épisode de séquences sèches de plus de 10 jours (Mbaiguedem, 2012). Dans ce mémoire, une étude fréquentielle a été effectuée sur les indicateurs agro-climatiques (date de début, fin et la longueur des saisons des pluies) et les séquences sèches. Le but de cette étude est d'apprécier l'évolution des saisons culturales ainsi que les séquences sèches (Sarr, 1995 *in* Traboulsi, 2012). Ainsi, elles sont classées en fonction des limites définies par le quartile inférieur (20 %), le quartile médian (50 %) et le quartile supérieur (80 %). Les dates inférieures ou égales à la valeur limite du quartile inférieur sont considérées comme précoces. Par contre, lorsqu'elles se trouvent supérieures ou égales à 80 %, elles sont tardives. Enfin, lorsqu'elles sont situées entre 20 % et 80 %, elles sont dites normales.

2.2.2 Caractérisation de la variation des extrêmes climatiques

La caractérisation de la variation des extrêmes climatiques débute par le calcul des indices d'extrêmes climatiques à partir du programme RCLimDex couplé au logiciel R-Studio. Les différentes étapes sont :

✓ **Contrôle de qualité des données dans Rclimdex**

Le procédé de contrôle de qualité dans RCLimDex aide à identifier les erreurs d'enregistrement qui peuvent exister sur les données quotidiennes. Le procédé de contrôle de qualité se base sur les principes suivants :

- remplacer la température maximale quotidienne des valeurs erronées par -99,9, si elle est inférieure à la température minimale quotidienne ;
- les observations journalières par année respectent les jours juliens ;
- 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 avant le contrôle de qualité par le logiciel.

✓ **Conditions à respecter**

MATERIEL ET METHODES

Tous les indices ne sont pas calculés sur une base mensuelle. Les indices mensuels sont calculés s'il ne manque pas plus de 3 jours dans un mois, tandis que les valeurs annuelles sont calculées si moins de 15 jours sont manquants dans une année. Aucune valeur annuelle ne sera calculée s'il manque des données d'un mois. Pour les indices de seuil, un seuil est calculé si au moins 70% des données sont présentés. Le seuil utilisé pour comptabiliser le nombre de jours secs ou pluvieux dans l'année est 1 mm (Aguilar *et al.*, 2009).

✓ Indices climatiques du logiciel RclimDex sélectionnés (Zhang & Yang, 2004)

Spécialement pour cette étude, 15 indices dont : 7 indices de températures extrêmes et 8 pour les précipitations extrêmes (Tableau II) ont été calculés sur la période 1989-2018.

Tableau II : Equations de base du logiciel RclimDex pour les indices à déterminer.

Identification	Equations
Précipitations	
PRCPTOT	$PRCPTOT = \sum \text{annuelle des RR}$
RX1Jour	$RX1Jour = \max (RR/1\text{jour})$
RX5Jour	$RX5Jour = \max (RR/5\text{jour})$
R95p	$R95p = \sum RR \text{ quotidienne avec } RR > 95^{\text{ème}} \text{ percentile}$
CDD	$CDD = \max (\text{jours consécutifs}) \text{ ou } RR < 1\text{mm}$
CWD	$CWD = \max (\text{jours consécutifs}) \text{ ou } RR > 1\text{mm}$
R10	$R10 = \sum \text{jours ou } RR \geq 10 \text{ mm}$
R20	$R20 = \sum \text{jours ou } RR \geq 20 \text{ mm}$
Températures	
TX _x	$TX_x = \max \text{ mensuelle (températures maximales journalières)}$
TN _x	$TN_x = \max \text{ mensuelle (températures minimales journalières)}$
TX _n	$TX_n = \min \text{ mensuelle (températures maximales journalières)}$
TN _n	$TN_n = \min \text{ mensuelle (températures minimales journalières)}$
WSDI	$WSDI = \sum \text{au moins 6 jours consécutifs ou } TX > 90^{\text{ème}} \text{ percentile}$
CSDI	$CSDI = \sum \text{au moins 6 jours consécutifs ou } TX < 10^{\text{ème}} \text{ percentile}$
DTR	$DTR = \text{moyenne annuelle de la } \sum (TX - TN)$

Avec RR=précipitation quotidienne ; T_x = température maximale et T_n = température minimale.

2.2.3 Détermination de la corrélation entre la variation des extrêmes climatiques et la production de la canne à sucre

La détermination de la corrélation entre la variation des extrêmes climatiques et la production de la canne à sucre se base sur deux analyses statistiques qui sont : l'analyse en composante principale et la régression linéaire multiple. Ces analyses sont basées sur le rendement.

2.2.3.1 Calcul du rendement

Le rendement de la canne à sucre pour chaque parcelle est le rapport entre les valeurs de production et les superficies cultivées (Equation 2).

$$\text{RENDEMENT} = \frac{\text{PRODUCTION}}{\text{SUPERFICIES}} \quad (\text{Equation 2})$$

2.2.3.2 Analyse en Composante Principale (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique qui facilite l'analyse conjointe d'un grand nombre de données, en tenant compte de leur caractère multidimensionnel, particulièrement dans le cas d'étude de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques (Ardoin, 2004). Cette méthode permet d'identifier les relations de dépendance et les modes de cohérence entre les différentes variables à travers un regroupement en un nombre limité de variables. La mise en place d'un ACP requiert plusieurs étapes :

❖ Choix de dimension (nombre q)

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. Dans cette étude, le critère de Kaiser en ACP normée a été utilisé. Ce critère consiste à attribuer le même poids à toutes les variables utilisées. Les axes associés à des valeurs propres supérieures à 1 sont considérés comme les composantes principales ou axes principaux.

❖ 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 . Ils 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.

❖ **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.

2.2.3.3 Régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple est une méthode statistique adaptée pour mettre en évidence l'influence des différents indices de pluies et de températures sur la tendance des productions observés au cours des campagnes 2006 à 2018. En d'autres termes, elle évalue statistiquement les sources de variations du rendement de la canne à sucre (ΔY) par rapport aux prédicteurs (ΔX_i) choisis. L'évolution du rendement de la canne à sucre (ΔY) des complexes de Ferké est traduite par l'équation 3 :

$$\Delta Y = \sum m_i * \Delta X_i + b \quad \text{(Equation 3)}$$

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

Cette équation ignore d'autres aspects des conditions d'extrêmes climatiques, tels que les sécheresses, l'ensoleillement qui provoque l'évaporation à la surface et les facteurs non climatiques, tels que l'humidité du sol, les réserves hydriques souterraines, les types de sols etc. Cette équation traduit une estimation utile de premier ordre de la variabilité d'une année sur l'autre du rendement de la canne à sucre des complexes sucriers au cours de la période étudiée (2006-2018).

Dans le but d'estimer de façon quantitative le taux de variance entre le rendement de la canne à sucre et les indices des extrêmes climatiques, les tendances statistiquement significatives pour des niveaux de significations marginales (p-value) < 0,05 soit une significativité au seuil 95 % ont été défini.

TROISIEME PARTIE :
RESULTATS ET
DISCUSSION

3.1 RESULTATS

3.1.1 Redéfinition de la saison agricole dans les complexes de Ferké

3.1.1.1 Dates de démarrage et de fin de la saison pluvieuse

➤ Dates de démarrage

Les dates de démarrage de la saison pluvieuse aux stations de Korhogo et Ferké sont présentées dans le tableau III. L'analyse de ces résultats montre que la date de démarrage de la saison des pluies oscille entre le 15 Mai et le 30 Juin à la station de Ferké tandis que pour celle de Korhogo la saison des pluies s'installe entre le 15 Mai et le 22 Juillet. Les dates de démarrages moyennes sont les 28 Mai et 4 Juin respectivement pour Ferké et Korhogo.

Tableau III : Dates de démarrage de la saison sur la période 1989-2018

Station	Période	Minimum	1 ^{er} quartile	Moyenne	2 ^{ème} quartile	3 ^{ème} quartile	Maximum	Ecart-type
Ferké	1989-2018	15 Mai	20 Mai	28 Mai	25 Mai	2 Juin	30 Juin	11
Korhogo		15 Mai	23 Mai	4 Juin	31 Mai	9 Juin	22 Juil	18

➤ Dates de fin

De façon générale, la saison pluvieuse prend fin au mois de novembre pour les deux stations (Tableau IV). La date moyenne est le 9 Novembre pour Ferké et le 7 Novembre pour Korhogo. Au niveau de la fin, notons que les plus précoces sont le 1er Novembre et les plus tardives sont comprises entre le 19 et le 21 Novembre. Plus de 80 % des saisons de pluie finissent avant le 21 Novembre à Ferkessédougou.

Tableau IV : Dates de fin de la saison sur la période 1989-2018

Station	période	Minimum	1 ^{er} Quartile	Moyenne	2 ^{ème} quartile	3 ^{ème} quartile	Maximum	Ecart-Type
Ferké	1989-2018	1 Nov	1 Nov	9 Nov	8 Nov	15 Nov	21 Nov	7
Korhogo		1 Nov	1 Nov	7 Nov	6 Nov	12 Nov	19 Nov	7

3.1.1.2 Durée de la saison pluvieuse

La saison pluvieuse a une durée moyenne de 157 jours, soit 5 mois 7 jours à la station de Ferké. A Korhogo, cette durée est de 150 jours, soit 5 mois effectif (Tableau V). Les durées minimums de

RESULTATS ET DISCUSSION

la saison pluvieuse se situent entre 111 (Ferké) et 102 jours (Korhogo). Les durées maximums de la saison pluvieuse se situent entre 182 (Korhogo) et 189 jours (Ferké).

Tableau V : Durées des saisons pluvieuses (jours)

Station	Période	Minimum	1 ^{er} quartile	Moyenne	2 ^{ème} quartile	3 ^{ème} Quatile	Maximum	Ecart-type
Ferké	1989-	111	139	157	161	175	189	22
Korhogo	2018	102	133	150	154	168	182	26

L'analyse de l'évolution interannuelle de la longueur de la saison des pluies montre une légère tendance à la hausse (Figure 6). Sur la période 1989-2018, la durée de la saison est comprise entre 110 et 190 jours, soit 157 jours en moyenne à la station de Ferké et de 102 à 182 avec une moyenne de 150 jours à Korhogo. De 1989 à 2000, la saison comptait 123 à 185 jours. La sous-période allant de 2000 à 2009 est marquée par une nette diminution de la longueur de la saison comprise entre 49 à 81 jours. De 2009 à nos jours, la durée de la saison est très instable. En année très pluvieuse, la saison dure 190 jours contre 110 jours en année à pluviométrie médiocre (Figure 6a). Pour la station de Korhogo, la tendance est quasi linéaire, néanmoins on constate une forte fluctuation autour de la moyenne de la longueur de la saison pluvieuse (Figure 6b).

RESULTATS ET DISCUSSION

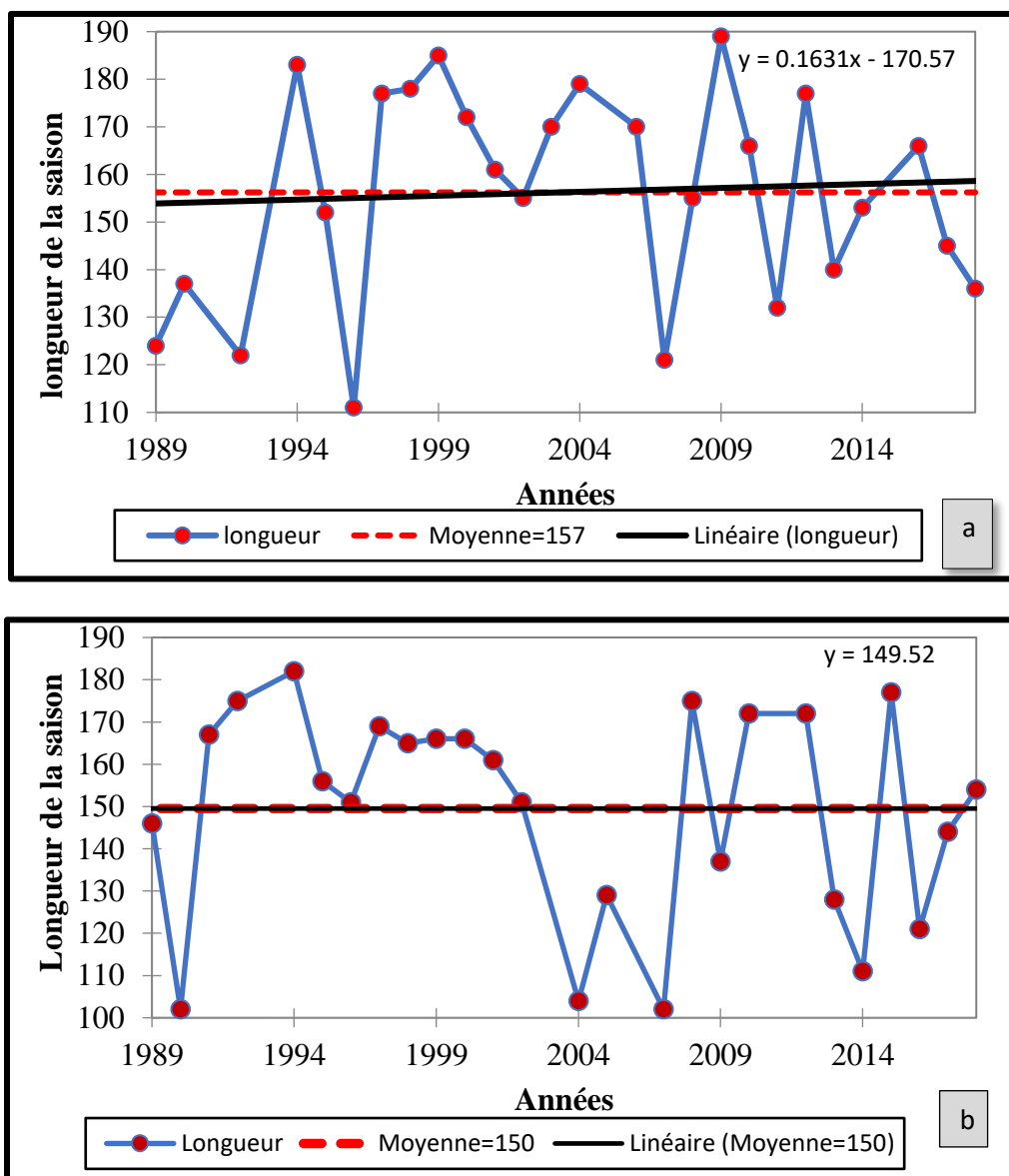


Figure 6 : Evolution interannuelle de la longueur de la saison des pluies : a) station de Ferké 2 ; b) station de Korhogo

3.1.1.3 Analyse des séquences sèches

Les localités de Ferké et de Korhogo enregistrent de longues séquences sèches pendant la saison pluvieuse (Tableau VI). En moyenne, des séquences sèches de 11 jours ont été enregistrées pendant la saison pluvieuse aux niveaux des deux stations. Une durée minimale de séquence sèche de 6 jours et un maximum de 23 jours ont été observées sur la période 1989-2018 à Korhogo. Tandis qu'à Ferké, on observe 7 jours minimum et un maximum de 21 jours. Ces séquences sèches

RESULTATS ET DISCUSSION

observées en pleine saison pluvieuse pourraient avoir des conséquences sur les pratiques agricoles de la région de Ferké.

Tableau VI : Moyennes et quartiles des séquences sèches pendant les saisons des pluies sur la période (1989-2018)

Station	Période	Minimum	1 ^{er} quartile	Moyenne	2 ^{ème} quartile	3 ^{ème} quartile	Maximum	Ecart-type
Ferké	1989-	7	9	11	10	13	21	4
Korhogo	2018	6	8	11	10	13	23	6

3.1.2 Caractéristique de la variabilité des extrêmes climatiques à la station de Ferké

Variabilité des pluies extrêmes à Ferkessédougou

Les figures 7 et 8 présentent les tendances de la variabilité des différents indices de précipitation extrême à la station de Ferké sur la période 1989-2018.

L'analyse de la droite de tendance linéaire (Figure 7a) montre une augmentation des totaux pluviométriques à Ferké ; cependant, cette hausse n'est pas statistiquement significative car le p-value est égal à 0,47. Néanmoins, cette hausse est estimée à 2,49 mm/an. La courbe de lissage indique trois phases d'évolution des cumuls pluviométriques annuels. La période 1989-2000 est une phase d'évolution presque constante ; cette phase est suivie d'une légère hausse de 2001 à 2012. La période 2013 à 2020 montre une chute des cumuls annuels.

L'évolution de l'indice R95p (Figure 7b) qui définit le cumul des précipitations supérieures au percentile 95 de la série temporelle pluviométrique, est marquée par une fluctuation à la baisse très légère. Cependant, cette tendance à la baisse n'est pas significative (avec un p-value égal à 0,90).

Bien que le cumul des pluies annuelles soit en hausse, l'indice des jours consécutifs pluvieux (CWD), évolue à la baisse avec un p-value égal à 0,03. Cette valeur montre que la baisse des jours consécutifs pluvieux est très significative. Contrairement à l'indice CWD, les jours consécutifs secs (CDD) évoluent à la hausse. A Ferké, le nombre maximum de jours humides consécutifs est de 3 à 9 jours tandis que les jours consécutifs secs atteignent 120 jours. En somme, l'évolution de ces deux paramètres confirme la baisse pluviométrique dans les complexes sucriers de Ferké.

RESULTATS ET DISCUSSION

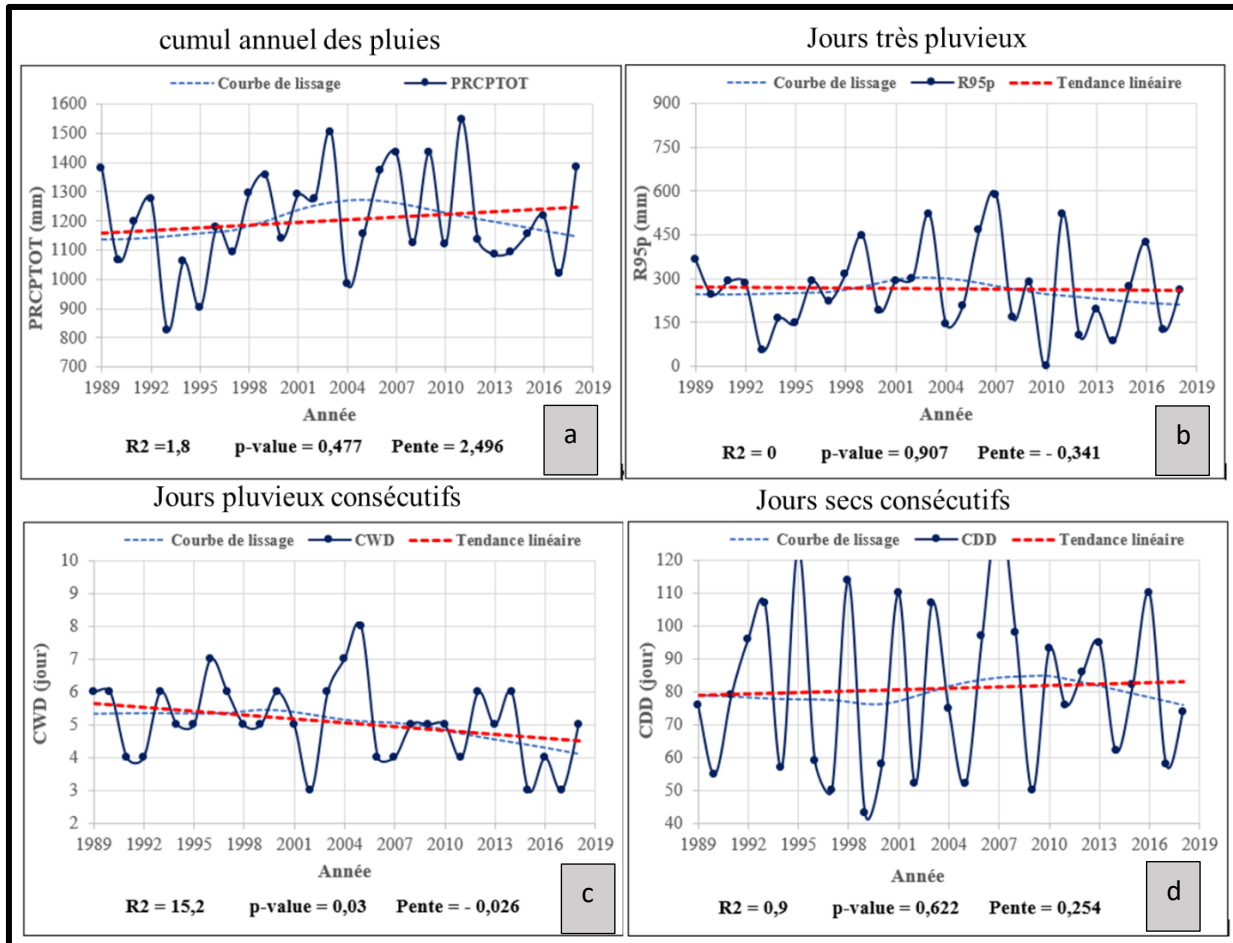


Figure 7 : Tendances des indices de précipitations extrêmes calculées sur la période 1989-2018 à la station de Ferké : (a) précipitation totale annuelle, (b) indice R95p, (c) indice CWD et (d) indice CDD.

Cette tendance d'évolution à la baisse est également confirmée par la baisse des hauteurs maximales (indices Rx1jour et Rx5jours) de 1 jour et 5 jours consécutifs pluvieux (Figure 8a et 8b). Cependant, cette régression est non significative avec les p-value respectifs de 0,38 et 0,48.

Aussi, le nombre de jours de pluie intense et très intense (R10 mm et R20 mm) montre une évolution à la hausse. Ces tendances ne sont pas significatives (Figure 8c et 8d) et évoluent dans le sens contraire aux hauteurs maximales d'un jour et de 5 jours consécutifs pluvieux. Ces résultats montrent que sur la période 1989-2018, il y a une augmentation des événements extrêmes alors que les jours consécutifs pluvieux sont en nette régression dans les complexes sucriers de Ferké.

RESULTATS ET DISCUSSION

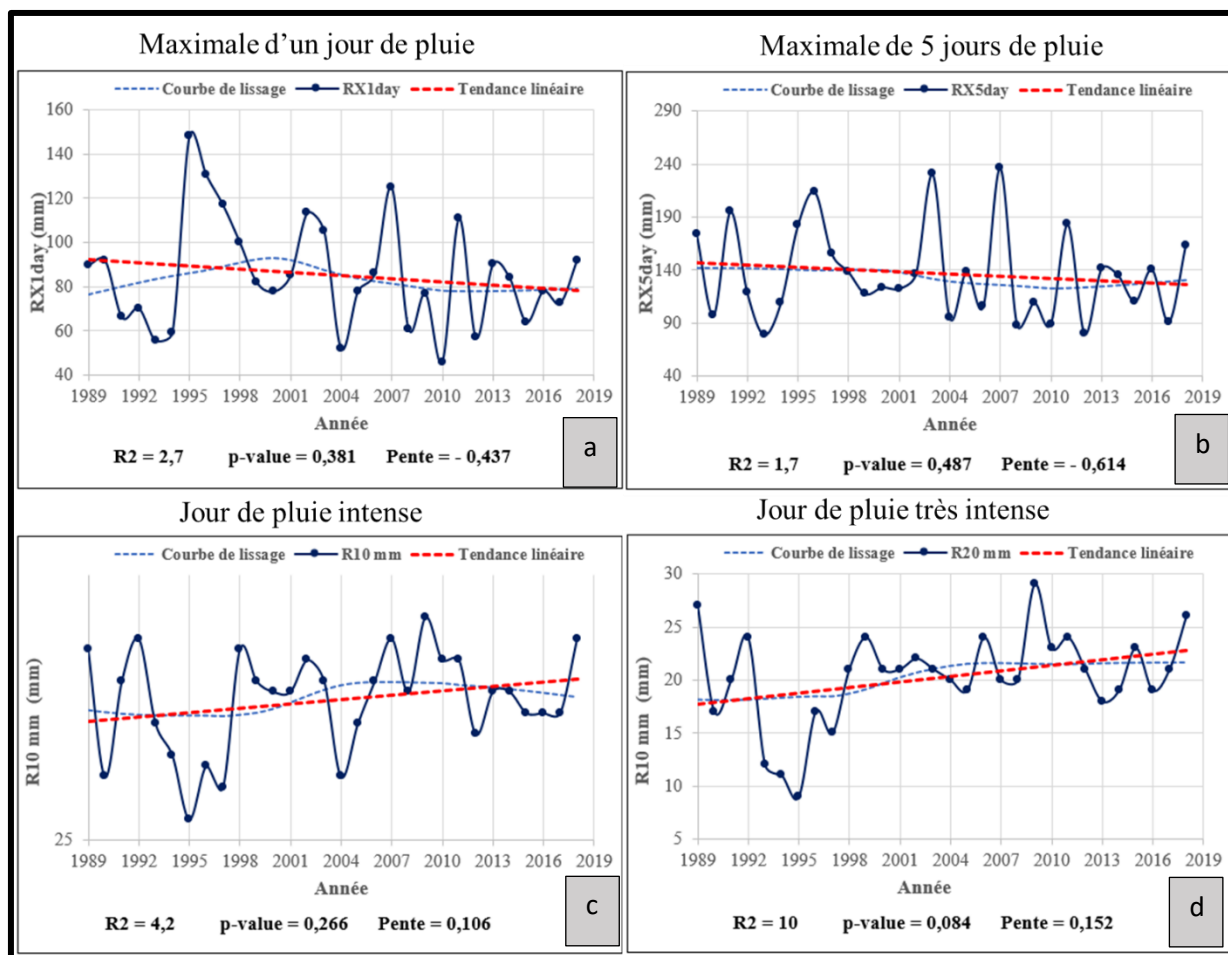


Figure 8 : Variation interannuelle des valeurs des indices : RX1jour (a), RX5jours (b), R10 mm (c) et (d) R20 mm.

✚ Variabilité des températures extrêmes à Ferkessédougou

L'analyse de la figure 9a et 9b montre une tendance généralisée à l'augmentation du maximum des températures maximales et minimales. La tendance est significative (la p-value égale à 0,09) pour maximum des températures minimales ; inversement pour le maximum des températures maximales (la p-value égale à 0,14). Le minimum des températures maximales et minimales de la série étudiée évolue en sens inverse (Figure 9c et 9d).

RESULTATS ET DISCUSSION

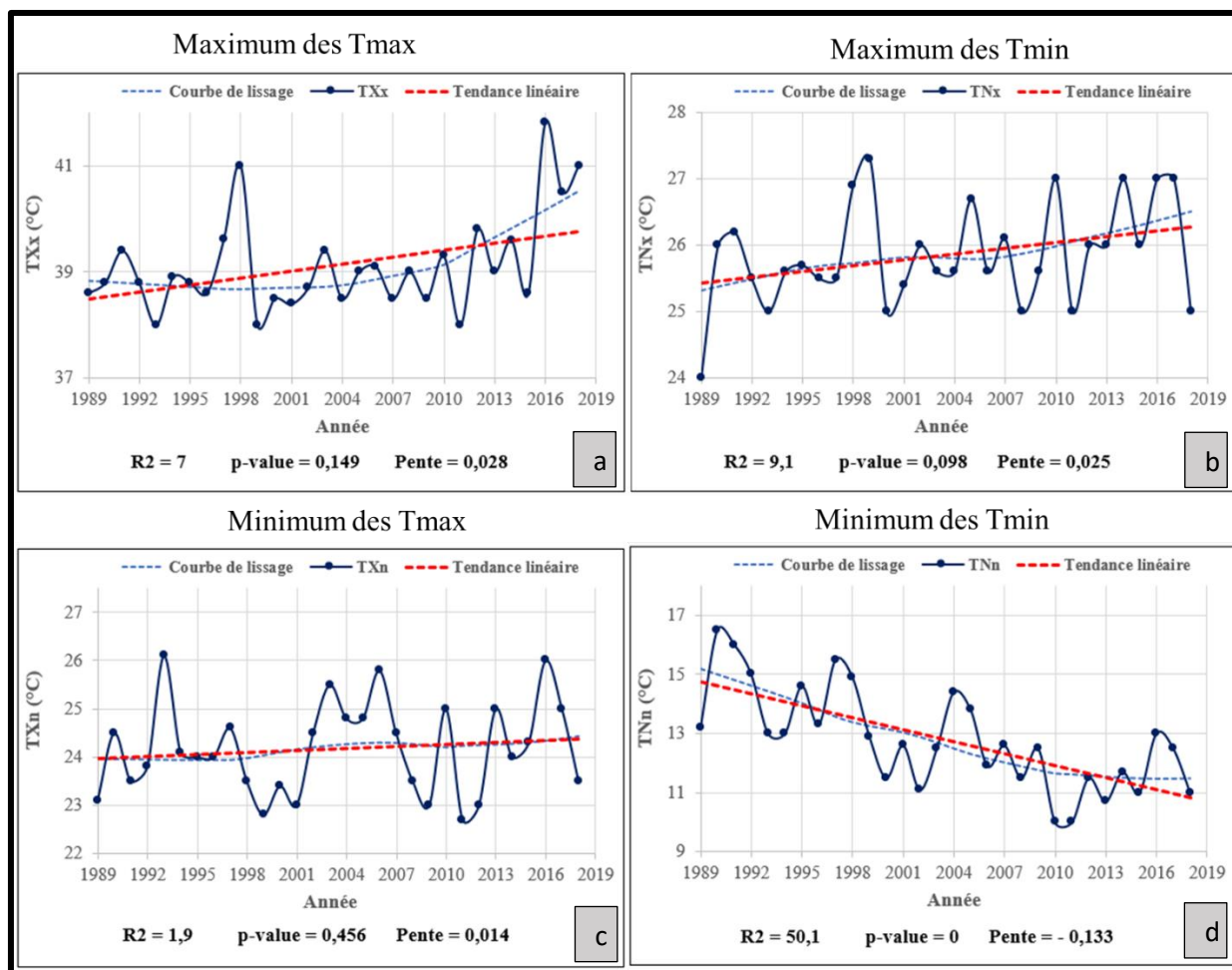


Figure 9 : Tendence des indices de températures extrêmes de 1989-2018 : a) maximum des températures maximales ; b) maximum des températures Minimales ; c) minimum des températures maximales ; d) minimum des températures minimales.

La tendance des indices des séquences fraîches et celle des séquences chaudes évoluent dans le même sens à Ferké comme l'indique la figure 10. Selon cette figure, le nombre de jours frais dans l'année a augmenté de 0,11% par an à Ferké ; pareillement, le nombre de jours chauds dans l'année a augmenté de 0,60 % par an. L'évolution de l'amplitude thermique diurne est également en hausse. En effet, la p-value des indices de durées des séquences chaudes et des amplitudes thermiques est inférieure à 0,05 ; ce qui indique que le réchauffement climatique constaté dans les complexes est très significatif.

RESULTATS ET DISCUSSION

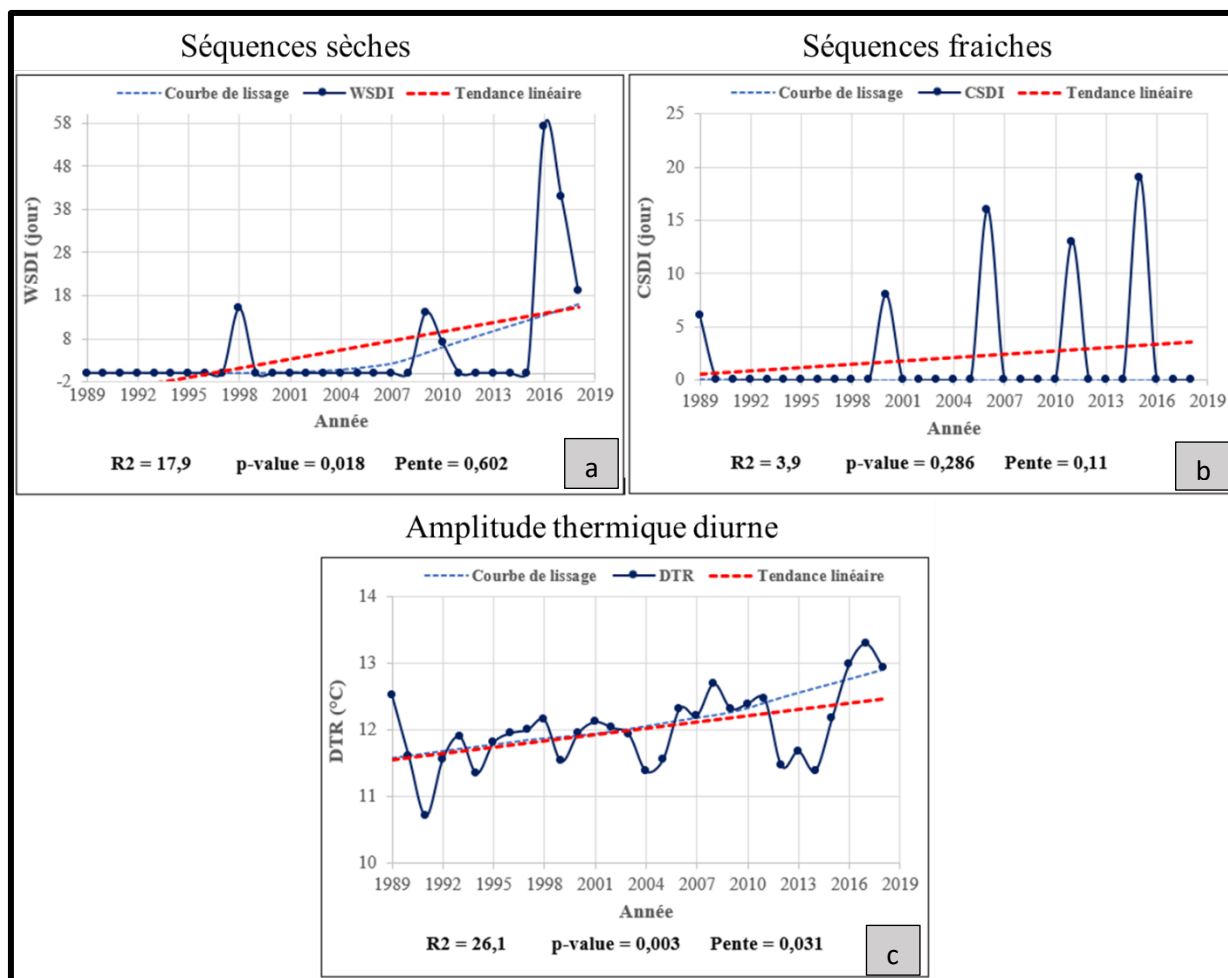


Figure 10 : Tendence des indices de températures extrêmes sur la période 1989-2018 : a) Durée des séquences chaudes ; b) Durée des séquences fraîches ; c) Amplitude thermique diurne

3.1.3 Corrélation entre la variation des extrêmes climatiques et la production de la canne à sucre

3.1.3.1 Relation entre le rendement de la canne à sucre et la pluviométrie

✚ Analyse du rendement de la canne à sucre des parcelles pluviales

Le tableau VII présente les rendements calculés à partir des données de production durant les campagnes de 2006 à 2018. Le rendement de la canne à sucre à Ferké 2 varie de 40,9 t/ha à 55,54 t/ha obtenus à la campagne 2014-2015. La superficie des parcelles cultivées est comprise entre 559,4 et 1 283,7 ha/an. On constate que de 2006 à 2012, les superficies des parcelles pluviales ont régressées certainement au profit des parcelles irriguées. Néanmoins, on remarque une reprise des superficies entre 2015 et 2018.

RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau VII : Rendements calculés à partir des données de production de 2006 à 2019

Campagnes	Superficies (Ha)	Production (T)	Rendement (t/ha)
2006-2007	1 222,8	54 527,08	44,593
2007-2008	1 004,4	41 854,74	41,670
2008-2009	718,5	29 394,96	40,909
2009-2010	559,4	19 311,8	34,524
2010-2011	637,6	28 843,62	45,239
2011-2012	752,1	35 719,32	47,494
2012-2013	1 108,5	53 030,58	47,841
2013-2014	878,5	48 794,44	55,542
2014-2015	1 188,1	64 696,7	54,453
2015-2016	1 125,7	49 514,48	43,985
2016-2017	1 113,3	56 741,16	50,966
2017-2018	1 283,7	66 622,26	51,898

Evolution du rendement en fonction de la pluviométrie de 2006 à 2018

La relation entre le rendement et le cumul des pluies de Novembre à Juillet est présenté sur la figure 11. On constate que, les deux variables évoluent dans le même sens. En effet, au cours des années de faibles hauteurs de pluie, le rendement de la canne à sucre baisse ; à l'exception de la campagne 2013-2014 où on enregistre le rendement le plus élevé de la période. Après une chute du rendement de la campagne 2009/2010, le graphique montre une augmentation régulière jusqu'à la campagne 2013/2014. Toutefois, il est nécessaire de signifier que sur cette période, les superficies cultivées ont été réduites. La campagne 2013-2014 s'est montrée plus productive avec un rendement estimé à 55,54 t/ha. Le rendement moyen pour les douze (12) campagnes agricoles s'élève à 45,8 t/ha.

RESULTATS ET DISCUSSION

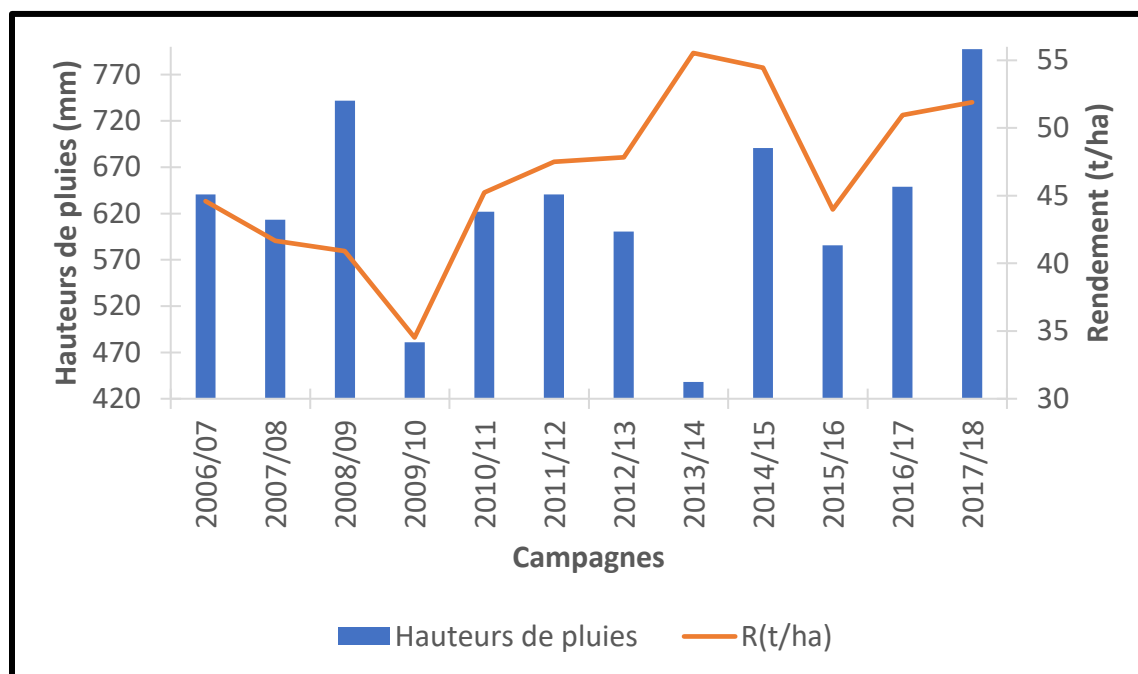


Figure 11 : Evolution du rendement agricole de la canne à sucre en fonction de la pluviométrie lors des campagnes à Ferkessédougou entre 2006 et 2018.

3.1.3.2 Analyse statistique de la relation paramètres climatiques extrêmes-rendement de la canne à sucres

✚ Analyse en Composante Principale (ACP)

Dans le cadre de cette étude, trois groupes de variables (G1, G2, et G3) sont utilisés. Le premier groupe (G1) est composé des rendements et les indices de précipitations extrêmes de la station de Ferké ; le second groupe (G2) est composé des rendements et les indices de températures extrêmes de ladite station et le troisième groupe (G3) est formé à partir de tous les indices climatiques, issus des deux premiers groupes. Cette répartition a permis dans un premier temps, de montrer la corrélation entre les rendements et les indices de précipitations extrêmes et dans un second temps la relation avec les indices de température extrêmes à la station de Ferké.

▪ Choix du nombre d'axes

Le tableau VIII ci-dessous présente les valeurs propres et le pourcentage de la variance exprimée par chaque factoriel (axe) des différents groupes de variables. Ces axes expriment 100 % de l'information recherchée. La dimension 1 exprime (45,35 % du groupe de variable G1 ; 42,38 % de G2 et 49,85 % de G3). La dimension 2 quant à elle exprime (26,70 % de G1 ; 21,05 % de G2 et

RESULTATS ET DISCUSSION

26,74 de G3). Cependant l'analyse s'est faite sur les deux premières dimensions. En effet les valeurs propres des différents groupes de variables obtenus respectent le critère de Kaiser ($VP > 1$). Ainsi le couple dim 1-dim 2 traduit à lui seul l'essentiel de l'inertie du jeu de données.

Tableau VIII : Valeurs propre et variance des différents axes G1, G2 et G3.

Groupe	Dim 1		Dim 2		Dim 3		Dim 4		Dim 5		VC%
	VP	PoV %	VP	PoV %	VP*	PoV %	VP	PoV %	VP	PoV %	
G1	4,08	45,35	2,40	26,70	1,09	12,20	0,83	9,32	0,350	3,88	72,05
G2	3,39	42,38	1,68	21,05	1,12	14,04	0,82	10,26	0,40	5,05	63,43
G3	1,99	49,85	1,07	26,74	0,82	20,64	0,11	2,75	-	-	76,59

VP : Valeur Propre, **PoV(%)** : Pourcentage de variance, **VC(%)** : Pourcentage cumulé de la variance des axes retenus. **G1** : Rend, PRCPTOT, RX1day, RX5day, R95p, CDD, CWD, R10 mm et R20 mm ; **G2** : Rend, TXx, TNx, TXn, TNn, WSDI, CSDI et DTR ; **G3** : Rend, DTR, CDD et R 20 mm ; **Dim** : Dimension.

▪ Groupe de variables G1

La figure12 présente le cercle de corrélation du groupe de variables G1. On remarque que les deux composantes principales expriment près de 72,05 % de l'inertie totale du jeu de données. En projetant les différentes variables sur les deux composantes principales choisies, on constate que la dimension 2 est représentée par les variables rendement, l'indice des jours consécutifs sec (CDD) et l'indice des jours de pluies intenses (R20 mm). Ainsi il existe une corrélation entre ces variables. Cependant, la position des variables rendement et R20 mm de part et d'autre de l'axe montre qu'elles évoluent en sens inverse. Pour les autres indices de précipitations, appartiennent à l'axe 1.

RESULTATS ET DISCUSSION

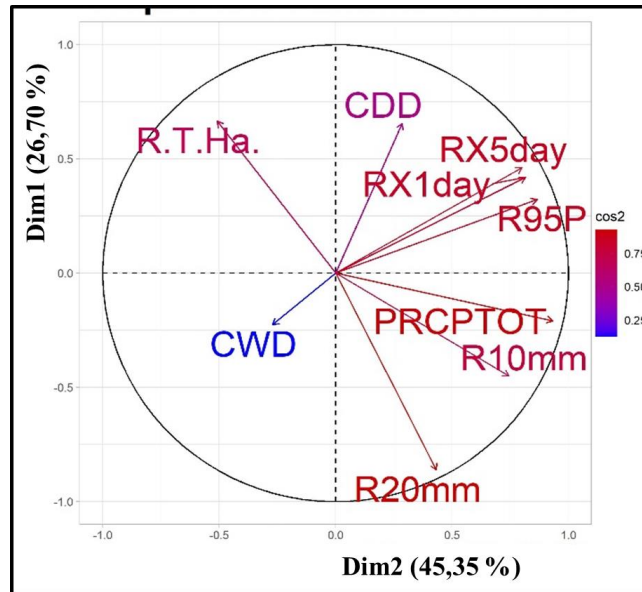


Figure 12 : Cercles de corrélation de groupes de variables G1

▪ Groupe de variables G2

Le cercle de corrélation présenté à la figure 13 montre que l'axe 2 (Dimension 2) est dominé par les variables rendements et l'indice de l'amplitude thermique diurne (DTR) tandis que les autres variables telles que : le maximum des températures minimums (TXx) ; le cumul des précipitations annuelles (PRCPTOT) etc., représentent l'axe 1 de cette analyse. De cette analyse, il ressort que les indices de températures extrêmes n'ont aucun effet sur le rendement.

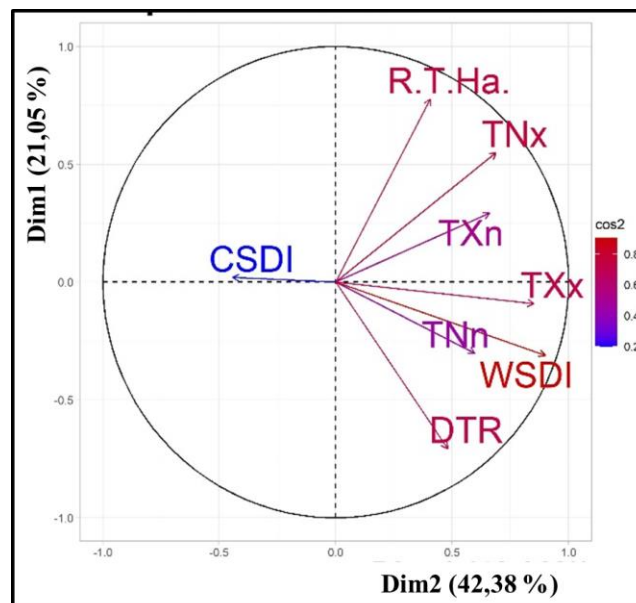


Figure 13 : Cercles de corrélation de groupes de variables G2

RESULTATS ET DISCUSSION

▪ Groupe de variables G3

Les composantes principales (Dimension 1) et (Dimension 2) expriment 76,50 % de l'information totale. On note que l'axe 1 est représenté par les variables rendement et R20 mm. Cependant, leur position de part et d'autre montre qu'elles sont non liées ou que l'un agit sur l'autre. Quant à l'axe 2, il est composé des indices CDD et DTR.

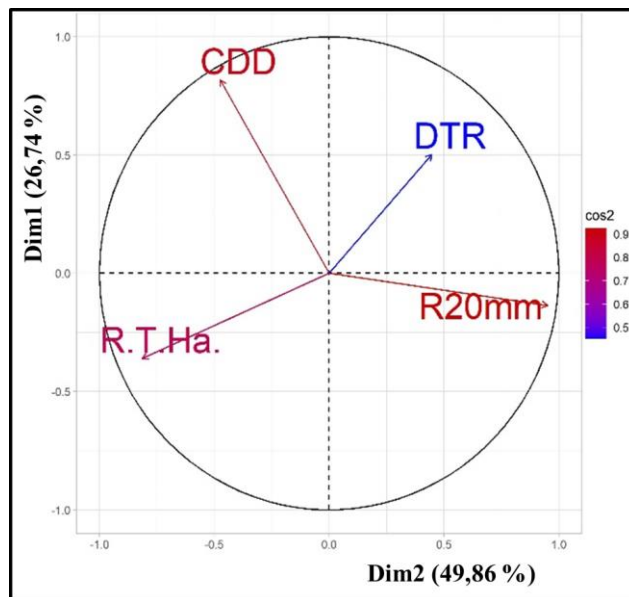


Figure 14 : Cercle de corrélation du groupe de variable G3

✚ modèles linéaires

A l'issue de l'Analyse en Composante Principale (ACP), les indices qui en sont sortis fortement corrélés avec le rendement ont servi à réaliser le modèle de régression linéaire afin de confirmer la corrélation entre ces indices et le rendement de la canne (Tableau IX). Les différents modèles linéaires traduits par les équations linéaires présentées dans le tableau montrent les relations statistiques qui existent entre le rendement et les indices climatiques. Les résultats des Equation 3, Equation 4, Equation 5 et 6 obtenus expriment la qualité de la régression car leur p -value $< 0,05$. L'analyse de ces équations de régression met en lumière les points suivants :

Le nombre de jours de l'année avec précipitation ≥ 20 mm (indice R20 mm) est corrélé négativement ($r = 0,71$; p -value = **0,0039**) avec le rendement. Ce qui pourrait expliquer une baisse du rendement durant les jours très pluvieux lors de la phase de maturation de la canne.

RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats sont beaucoup améliorés lorsque nous passons aux modèles linéaires à trois variables. De ce fait, les équation 4 et équation 5 expliquent respectivement près de 67% ($r = 0,82$; $p\text{-value} = \mathbf{0,0016}$) et près de 46% ($r = 0,69$; $p\text{-value} = \mathbf{0,01}$) de la variance du rendement.

L'équation 6 exprime 63% ($r = 0,79$; $p\text{-value} = \mathbf{0,0069}$) de la variance du rendement.

Tableau IX : Corrélation entre le rendement et les indices par la méthode de régression

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

3.2 DISCUSSION

L'objectif de cette étude est de caractériser la variabilité des extrêmes climatiques et leur influence sur la production de la canne à sucre dans les complexes sucriers de Ferkessedougou (SUCAF-CI). La redéfinition de la saison agricole a permis de mettre en évidence l'importante irrégularité pluviométrique à Ferké et Korhogo, notamment au niveau des facteurs clés de la saison culturale. En effet, la saison agricole dans les localités de Ferké et Korhogo débute en moyenne respectivement le 28 Mai et le 4 Juin. Ces résultats sont différents de ceux de (Kouassi *et al.*, 2018). Dans leur étude, la saison débute en moyenne entre le 26 mars et le 18 avril sur la période 1951-2000. Cette différence pourrait être due aux choix de la période d'étude ; notre période d'étude étant de 1989-2018. Aussi, le démarrage tardif des saisons dans les villes du Nord du pays a été également mis en évidence par les résultats des tests statistiques appliqués aux pluies annuelles dans les travaux de Goula *et al.* (2006) et Kouassi *et al.*, 2008. Cela pourrait être dû aux conséquences du mouvement, en zone guinéenne et soudano-guinéenne, de la mousson humide qui s'étend du Sud-ouest vers le Nord-est de la Côte d'Ivoire. Les travaux de Noufé *et al.* (2015), Kanga (2017) et Dékoula *et al.* (2018) ont confirmé cette tendance. Les dates de fin de la saison pluvieuse sont moins irrégulières que celles des débuts de la saison, et elles surviennent généralement en mi-novembre. Selon Dékoula *et al.* (2018), contrairement aux dates de début de

RESULTATS ET DISCUSSION

la saison des pluies, les dates de fin de la saison des pluies ne suivent pas le mouvement de la mousson humide. La saison des pluies dure en moyenne entre 150 et 157 jours dans les localités de Ferké et Korhogo. Ces résultats sont contraires à ceux de Kouassi *et al.* (2008). La longueur de la saison des pluies obtenus par ces auteurs se situe en moyenne entre 175 et 197 jours. On observe donc un raccourcissement des saisons. En effet, lorsque les pluies débutent précocement, la durée de la saison pluvieuse est plus longue. A l'opposé, lorsque les pluies débutent tardivement, la durée de la saison pluvieuse est considérablement raccourcie (Kouassi *et al.*, 2018). Les séquences sèches moyennes observées sont de 11 jours avec des maximums de 23 et 21 jours respectivement à Korhogo et Ferké. En Côte d'Ivoire l'axe dominant des vents entraîne une décroissance des pluies du Sud-ouest vers le Nord-Est. Il découle de ces phénomènes, des séquences sèches plus importantes dans chaque saison des pluies à Ferké et Korhogo. Ces résultats corroborent ceux de Kouassi *et al.* (2010), Kanga (2017) et Dékoula *et al.* (2018). Cependant, pour une bonne croissance de la canne, il est nécessaire qu'il ne manque pas d'eau pendant sa phase de croissance qui se situe entre les 5 ou 7 premiers mois selon Fauconnier (1991). Il est donc judiciable de planter les parcelles pluviales à partir de la dernière décade du mois de Mai pour s'assurer avoir une bonne croissance avant le début de la sécheresse.

L'application des indices climatiques extrêmes dans les complexes sucriers de Ferkessédougou a mis en évidence une augmentation du cumul des précipitations annuelles et du nombre de jours très pluvieux à la station de Ferké 2 sur la période 1989-2018. Cette hausse n'est pas significative statistiquement. En effet, les études dont la période s'étend au-delà de 2000, ont montrés une légère hausse de la pluviométrie. Ce même constat a été fait par Brou *et al.* (2005). Contrairement au cumul des précipitations, le nombre de jours pluvieux consécutifs est en baisse avec une tendance très significative. Tandis que l'indice de jours consécutifs secs est en hausse dans la zone de Ferké. En effet, l'on note une perturbation dans la durée et la période des saisons qui révèle un raccourcissement de la saison pluvieuse au profit de la saison sèche qui s'allonge (Anon, 2012 Kouakou *et al.*, 2017). Cette baisse de la pluviométrie est le signe de la variabilité du climat dont la fréquence et l'intensité ont augmenté durant les 30 dernières années occasionnant en particulier un fort déficit hydrique dans la zone de Ferké (Brou *et al.*, 1999). Ces baisses de pluies en Côte d'Ivoire et particulièrement à Ferké, seraient causées aussi par la déforestation en cours entraînant des modifications et des perturbations au niveau du cycle hydrologique. Les résultats sur l'évolution à la hausse du nombre de jours de pluies intenses (R10 mm) et celui des jours de pluies

RESULTATS ET DISCUSSION

très intenses (R20 mm) confirment l'évolution des cumuls annuels de précipitations. Selon les travaux de Atcheremi *et al.* (2018), l'occurrence d'une séquence de jours consécutifs secs (CDD) au sein de la saison des pluies peut avoir un impact fort sur la production agricole. Les séquences sèches créent un manque d'eau au niveau de la plante. Quand elles interviennent au début ou en pleine phase de croissance, elles peuvent être à l'origine d'un faux démarrage de saison ou encore hypothéquer toute une campagne agricole. La tendance d'évolution du maximum des températures maximales et minimales, de la durée des séquences chaudes et de l'amplitude thermique diurne à Ferké 2 est à la hausse de façon générale. En effet Le réchauffement pourrait être liée aux activités humaines qui ont tendance à augmenter l'émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par (Kouakou *et al.*, 2014), sur l'évolution des températures en Afrique de l'Ouest. Ces différents travaux indiquent une tendance positive plus ou moins significative des différentes températures au niveau local ou régional.

L'étude de la corrélation entre les indices climatiques extrêmes et le rendement de la canne à sucre présente des coefficients de détermination variant de 46% à 67%. Ces coefficients sont beaucoup plus significatifs pour des modèles à deux variables impliquant les indices (DTR et CDD) ou (R20 mm et CDD). Cependant, contrairement aux autres indices, l'indice des jours de pluie très intenses (indice R20 mm) exprime à lui seul 50% de la variation du rendement. En effet cette étude révèle une corrélation négative entre l'indice des jours de pluies très intenses et le rendement. Cela traduit que l'augmentation de R20 mm entraîne une diminution du rendement. En effet, pendant la phase de pré-croissance des précipitations trop importante peuvent affecter le développement de la plante lorsque le drainage est inefficace. Ce qui corrobore avec les travaux de Binbol *et al.* (2006). Par ailleurs, certains auteurs (Romero *et al.*, 2005) spécifient que les facteurs climatiques interviennent lors des processus biologiques de la plante et sont très déterminants sur le rendement des plantations industrielles. D'autres (Lisson *et al.*, 2005), précisent que le manque d'eau est très néfaste, particulièrement lors des phases de croissance des plantes mais reste favorable à l'accumulation de saccharose dans la canne à sucre. Ils soulignent qu'un apport d'eau modéré est préconisé en pré maturation, tandis que l'apport normale l'est en tallage-grande culture. La température ressort également dans certains modèles d'étude des rendements (Pagani *et al.*, 2017). Si l'augmentation de celle-ci est souvent considérée comme bénéfique pour la canne à sucre, (Hunsigi, 2012). Deressa *et al.* (2005) considère que cette relation est quadratique : les températures supérieures à 35°C peuvent altérer la croissance de la plante. Or, à Ferké 2, la température moyenne

RESULTATS ET DISCUSSION

du mois le plus chaud a toujours été supérieur à 35°C, et a atteint 38°C, certaines années. Ainsi, notre étude a permis de montrer que les précipitations et les différentes formes de température sont autant des facteurs qui peuvent affecter le rendement de la canne à sucre dans les périmètres sucriers. Cependant, cette étude ne tient pas compte de la variété de canne à sucre cultivée sur les parcelles et des sols rencontrés dans la région.

CONCLUSION

CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour objectif principal de caractériser la variabilité des extrêmes climatiques et leur influence sur la production de la canne à sucre dans les complexes sucriers de Ferkessedougou (SUCAF-CI). Pour y parvenir, trois objectifs spécifiques ont été défini : le premier a consisté à redéfinir la saison agricole dans les complexes sucriers. Le second objectif a porté sur la caractérisation de la variation des extrêmes climatiques à la station de Ferké. Le troisième s'est intéressé à la détermination de la relation entre la variation des extrêmes climatiques et la production de la canne à sucre.

Les résultats montrent que les dates de démarrage de la saison pluvieuse oscillent entre le 15 Mai et le 30 Juin à la station de Ferké tandis que celles de Korhogo s'installent entre le 15 Mai et le 22 Juillet. Les dates de démarrages moyennes sont les 28 Mai et 4 Juin respectivement pour Ferké et Korhogo. La saison pluvieuse a une durée moyenne de 157 jours, soit 5 mois 7 jours à la station de Ferké. A Korhogo, cette durée est de 150 jours, soit 5 mois effectif la saison dure 190 jours contre 110 jours en année à pluviométrie médiocre.

Bien que le cumul des pluies annuelles soit en hausse, l'indice des jours consécutifs pluvieux (CWD), évolue significativement à la baisse avec une p-value égale à 0,03. Contrairement, les jours consécutifs secs (CDD) évoluent à la hausse. A Ferké, le nombre maximum de jours humides consécutifs est de 3 à 9 jours tandis que les jours consécutifs secs atteignent 120 jours. Ainsi sur la période 1989-2020, on note une augmentation des événements extrêmes tandis que les jours consécutifs pluvieux sont en nette régression dans les complexes sucriers de Ferké. La tendance des indices des séquences fraîches (CSDI) et celle des séquences chaudes (WSDI) évoluent dans le même sens à Ferké. Il en est de même pour l'amplitude thermique diurne (DTR). La p-value des indices de durées des séquences chaudes et des amplitudes thermiques est inférieure à 0,05. Par conséquent, le réchauffement climatique constaté dans les complexes est très significatif.

L'ACP associée à la régression linéaire multiple a permis de montrer les différents indices qui influenceraient le mieux le rendement. Ainsi, à l'issue de cette analyse, il convient de noter que le nombre de jours de l'année avec précipitation ≥ 20 mm (indice R20 mm) exprime à lui seul 50% de la variabilité du rendement. En outre, l'équation 3, montre que toute augmentation d'un jour de pluies très intenses entraîne systématiquement une diminution du rendement de 1,39 t/ha. De même toute augmentation d'un jour consécutifs secs (indice CDD) entraîne systématiquement une diminution du rendement de 0,12 t/ha respectivement dans l'équation 4. Ces résultats indiquent clairement que le rendement de la canne à sucre est influencé par les évènements climatiques

CONCLUSION

extrêmes. 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 dans l'ambition d'améliorer la production de la canne à sucre. Cette étude, loin de traiter tous les enjeux liés aux impacts de la variation des extrêmes climatiques sur les productions sucrières des complexes sucriers de Ferkessedougou, ouvre la voie à plusieurs perspectives en vue d'éviter des problèmes liés à la replantation des cannes. Il est question de :

- Approfondir l'évaluation des impacts des extrêmes climatiques sur la production de la canne à sucre à l'aide de modèle agro climatologique tel que le modèle Mosisca qui est un modèle de simulation du rendement de la canne à sucre.
- Mettre en place un programme climatique régional unique à la Côte d'Ivoire pour mieux traiter les phénomènes de changements climatiques extrêmes.

REFERENCES

REFERENCES

- Adiaffi B., Wango T.E., Gnamba F.M., Kpan O.J.G. & Baka D. (2016). Analyse de la relation pluie-débit dans un contexte de variabilité climatique dans la région de Katiola. *International Journal of Engineering Science Invention*, 12(5) : 38-45.
- Aguilar E., Barry A.A., Brunet M., Ekan L.A., Fernandes M., Massoukina J., Mbah A., Mhanda D., Nascimento 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 : 1-11.
- Anon S.R.F. (2012). Contribution à l'analyse des impacts des changements climatiques sur la production agricole de la zone périurbaine de Korhogo. Diplôme d'Agronomie Approfondie (DAA), Ecole Supérieure d'Agronomie (ESA) de l'Institut National Polytechnique Félix-Houphouët Boigny (INPHB), Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 95 p.
- Ardoin B.S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrogéographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat en Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, Université de Montpellier II, (Montpellier, France), 440 p.
- Atcheremi K.N.D., Jourda J.P.R., Saley M.B., Kouamé K.J., & Balliet R. (2018). Etude de l'évolution des extrêmes pluviométriques et de température dans le bassin versant de rivière Davo (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire) à partir de certains indices du logiciel RCLIMDEX. *Larhyss Journal*, 36 : 99-117.
- Bernard S. (2010). Le changement climatique : conséquences pour les végétaux. *QUADERNI*, 71 : 27-40
- Bezuidenhout C.N, O'Leary G.J., Singels A. & Bajic V.B. (2003). A process-based model simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. *Agricultural Systems*, 76 : 589-599.
- Binbol N., Adebayo A. & Kwon N.E. (2006). Influence of climatic factors on the growth and yield of sugar cane at numan, Nigeria. *Climate Research*, 32 : 247-252.

REFERENCES

- Boko K.A.N. & Brama K. (2016). Variabilité climatique et changements dans l'environnement à Korhogo en Côte d'Ivoire : Mythes ou réalité? *European Scientific Journal*, 12(5) : 158-176.
- 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.
- Brou Y.T., Servat E., Paturel J.E. (1999). Contribution à l'Analyse des inter-relations entre activités humaines et variabilité climatique : cas du sud-forestier ivoirien, *Comptes Rendus de l'Académie des sciences, Paris (France)*, 327 p.
- Brou YT., Bigot S. & Francis A. (2005). La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures, Agence Universitaire de la Francophonie (AUF)*, 14(6) : 533-540.
- Cattiaux J., & Ribes A. (2018). Defining single extreme weather events in a climate perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(8) : 1557-1568.
- CCNUCC (1992). Convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques. Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (CNUED), 3-14 juin 1992, Rio de Janeiro (Brazil), pp 4-5.
- Christophe P. 2013. Influence de la température sur la phénologie de la canne à sucre. Conséquences Sur La Phase D'implantation De La Culture Dans Les Hauts De La Réunion. Thèse de Docteur de l'Université de La Réunion, France, 187 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 en Hydrologie, Université Montpellier (Montpellier, France), 240 p.
- Dékoula S.C., Kouamé B., N'goran K.E., Yao G.F., Ehounou J.N. & Soro N. (2018). Impact de la variabilité pluviométrique sur la saison culturale dans la zone de production cotonnière en Côte d'Ivoire. *European scientific journal*, 14(12) : 143-159.

REFERENCES

- Deressa T., Hassan R. & Poonyth D.a (2005). Measuring the impact of climate change on south african agriculture : the case of sugarcane growing regions. *Agrekon*, 44(44) : 524-542.
- Doukpolo B. (2014). Changements climatiques et productions agricoles dans l'Ouest de la République Centrafricaine. Thèse de Doctorat en Sciences de la Terre. Université d'Abomey-Calavi, Benin, 338 p.
- Driouech F. (2010). Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatiques : descente d'échelle et incertitudes. Thèse de doctorat en Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace, Institut National Polytechnique de Toulouse, (Toulouse, France), 164 p.
- Fauconnier R. (1991). La canne à sucre. Paris : Maisonneuve et Larose. Le Technicien d'Agriculture Tropicale, 165 p.
- Fossou R.M.N., Lasm T., Soro N., Soro T., Soro G., Lasmé D.O.Z., Onetié O.Z. & Orou R. (2015). Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Larhyss Journal*, 21 : 97-120.
- Frei C. & Schär C., 2001. Detection probability of trends in rare events : theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *Journal of climate*, 14 : 1568-1584.
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, Suisse, 103 p.
- GIEC (2011). Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat., État de New York (États-Unis d'Amérique), 171 p.
- GIEC (2012). Résumé à l'intention des décideurs. *In* : Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L.,

REFERENCES

- Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.K., Allen S.K., Tignor M. & Midgley P.M. (Eds.), État de New York (États-Unis d'Amérique), pp. 1-19.
- Goubanova K. (2007). Une étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et de leur évolution future. Thèse de Doctorat en Sciences de l'environnement, Université de Paris 6 (Paris, France), 119 p.
- Goula B.T.A., Savané I., Konan B., Fadika V., & Kouadio G.B. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'zo et N'zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*, 17(1) : 1-12.
- Hunsigi G. (2012). Production of Sugarcane : Theory and Practice. Advanced Series in Agricultural Sciences 21, Bangalore (Inde), 91 p.
- Jourda J.P.R. (2005). Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'État Ès Sciences, Naturelles, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 398 p.
- Kanga K.H.M. (2017). Sècheresse et vulnérabilité socio-spatiale dans le quart nord-est de la Côte d'Ivoire. Thèse unique de doctorat en Communication, Milieu et Société, Université Alassane Ouattara (Bouaké, Côte d'Ivoire), 347 p.
- Karl T.R., Nicholls N. & Ghazi A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: workshop summary. *Clim Change*, 42 : 3-7.
- Konan E.A., Péné C.B. & Dick E. (2017). Caractérisation agro-climatique du périmètre sucrier de Ferké 2 au Nord de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 116 : 11532-11545.
- Kouakou K.E., Kouadio Z.A., Kouassi F.W., GOULA T.A.B & Savane I. (2014). Modélisation de la température et de la pluviométrie dans un contexte de changement climatique : cas de l'Afrique de l'Ouest. *Afrique Science*, 10(1) : 145-160.
- Kouakou K.E, Kouassi A.M., Kouadio Z.A., Zoura B.J., Goula B.T.A. & Savane I. (2017). Caractérisation des saisons des pluies dans un contexte de changement climatique : cas du bassin versant de Sassandra (Côte d'Ivoire). *Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal*, 1(1) : 11-26.

REFERENCES

- Kouakou Y.E., Koné B.C.G., Djè K.B., N'Go Y.A., Konaré A., Savané I. (2013). Environmental Vulnerability Index: application to the White Bandama Bassin in the northern Côte d'Ivoire. *International Journal of Conservation Sciences*, 3(4) : 357-369
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Goula B.T.A., Lasm T., Paturel J.E., & Biémi J. (2008). Influence de la variabilité climatique et de la modification de l'occupation du sol sur la relation pluie débit à partir d'une modélisation globale du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 11 : 207-229.
- Kouassi A.M., Kouamé K.F., Koffi Y.B., Djé K.B., Paturel J.E. & Oularé S. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergéo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, 513 : 1-29.
- Kouassi A.M., Kouassi N'G.J., Dje K.B., Kouame K.F. & Biemi J. (2018). Analyse de la duree de la saison pluvieuse en fonction de la date de demarrage des pluies en afrique de l'ouest : Cas Du Bassin Versant Du Bandama En Côte d'ivoire. *Agronomie Africaine* 30 (2) : 147-156.
- Leroux M. (1980). Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse de doctorat en faculté des lettres et sciences humaines, Université de Bourgogne (Bourgogne, France), 439 p.
- Lionello P., Malanotte R.P. & Boscolo R. (2006). Mediterranean Climate Variability. *Elsevier*, 37 : 11-15.
- Lisson S.N., Bamber-Inman N.G., Robertson M.J. & Keating B.A. (2005). The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research*, 9 : 321-335.
- Maurette N. (2011). Caractérisation des pratiques de fertilisation de la canne à sucre et de leurs déterminants dans le Territoire de la Côte Ouest de la Réunion. Mémoire de fin d'études en Production Végétale Durable, Gestion des ressources renouvelables et environnement (UPR GREEN – CIRAD) de Saint Denis de la Réunion, France, 94 p.

REFERENCES

- Mbaiguedem M. (2012). Etude de vulnérabilité et adaptation des femmes rurales face au changement climatique : Cas du Département du Chari au Tchad. Master. Centre Régional AGRHYMET. 85 p.
- Noufé D., Lidon B., Mahé G., Servat E., Brou Y.T., Koli B.Z. & Chaléard J.L. (2015). Variabilité climatique et production de maïs en culture pluviale dans l'Est ivoirien. *Hydrological Sciences Journal*, 56(1) : 152-167.
- ONERC 2018 : Ces évènements extrêmes résultent de l'accumulation de plusieurs autres évènements météorologiques. Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2018.
- Ouedraogo 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 Montpellier II, 257 p.
- Pagani V., Stella T., Guarneri T., Finotto G., van den Berg M., Marin F.R., Acutis M. & Confalonieri R. (2017). Forecasting sugarcane yields using agro-climatic indicators and canegro model : A case study in the main production region in brazil. *Agricultural Systems*, 154 :45–52.
- Péné B.C. & Assa A.D. (2003). Variations interannuelles de la pluviométrie et de l'alimentation hydrique de la canne à sucre en Côte d'Ivoire. *Sécheresse*, 14 : 43-52.
- Péné C.B. & Koulibaly G.S. (2011). Sugarcane yield variations in northern and central Ivory Coast as influenced by soil water balance over two critical growth stages. *Journal of Agriculture, Science and Technology*, 33(2) : 220-225
- Péné C.B., Boua M.B. & Coulibaly O.Y. (2019). Nouvelles variétés de canne à sucre (*Saccharum officinarum*) adaptées aux conditions pluviales dans les périmètres sucriers de Ferké au Nord Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 134 : 13702-13710
- Peterson T.C., Taylor M.A., Demeritte R., Duncombe D.L., Burton S., Thompson F., Porter A., Mercedes M., Villegas E., Fils R.S., Tank A.K., Martis A., Warner R., Joyette A., Mills

REFERENCES

- W., Alexander L. & Gleason B. (2002). Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *Journal of geophysical research atmospheres*, 107(21) : 1-9.
- Romero E.R., Scandalariis J., Tonatto J., Leggio Neme M., Sotomayor, (2005). Effects of different management factors on plant cane emergence in Tucuman-Argentina. *Avance Agroindustrial*, 23(2) : 7-11.
- Stern (2006). L'effet du changement climatique et du réchauffement global sur la planète. Rapport Stern sur l'économie du changement climatique, Royaume-Uni, 700 p.
- Soro T.D., Kouakou B.D., Kouassi E.A., Soro G., Kouassi A.M., Kouadio K.E., Yéi M.S.O. & Soro N. (2013). Hydroclimatologie et dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *Vertigo*, 13(3) : 1-22.
- Tiemoko D.T., Yoroba F., Diawara A., Kouadio K., Kouassi B.K. & Yapo A.L.M. (2020) Understanding the Local Carbon Fluxes Variations and Their Relationship to Climate Conditions in a Sub-Humid Savannah-Ecosystem during 2008-2015: Case of Lamto in Cote d'Ivoire. *Atmospheric and Climate Sciences*, 10 : 186-205.
- Traboulsi M. (2012). La saison pluvieuse au Proche-orient : une tendance au raccourcissement. *Revue Climatologie*, 9 : 9-29.
- Youan T.M. (2008). Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat de l'Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 237 p.
- Zhang X. & Yang F. (2004). RCLimDex 1.0, User Manual. Climate Research Branch Environment, Downsview, Ontario, Canada, 23 p.

RESUME

La canne à sucre est produite sous tous les climats. Cependant, ces dernières décennies, le dérèglement climatique impacte la culture de la canne à sucre. Cette étude vise à caractériser la variabilité des extrêmes climatiques et leur influence sur la production de la canne à sucre dans les complexes sucriers de Ferkessédougou. La démarche méthodologique s'appuie sur la redéfinition de la saison agricole à l'aide du logiciel R-Instat. La détermination des tendances d'évolution des indices climatiques avec le logiciel RclimDex. Enfin, la corrélation entre les paramètres climatiques extrêmes et la production de la canne à sucre a été analysée à l'aide de tests statistiques. Les résultats montrent que les dates de démarrage de la saison pluvieuse oscillent entre le 15 mai et le 30 juin à Ferké et à Korhogo entre le 15 mai et le 22 juillet. Bien que le cumul des pluies annuelles soit en hausse sur la période 1989-2018, l'indice des jours consécutifs pluvieux (CWD) évolue à la baisse. Les paramètres de températures sont en hausses sur la période de l'étude. La matrice de corrélation en appuie avec la régression linéaire confirme que le nombre de jours de l'année avec précipitation ≥ 20 mm (indice R20 mm) influence négativement sur le rendement.

Mot clés : extrêmes climatiques, canne à sucre, Côte d'Ivoire, R-Studio, SUCAF-CI.

ABSTRACT

Sugar cane is produced in all climates. However, in recent decades, climate change has an impact on sugarcane production. This study aims to characterise the variability of climatic extremes and their influence on sugarcane production in the sugar complexes of Ferkessédougou. The methodological approach is based on the redefinition of agricultural season using the R-Instat software. Then the determination of the evolution trends of the climatic indices with RclimDex software. Finally, the correlation between extreme climatic parameters and sugarcane production was analysed using statistical tests. The results show that the starting dates of rainy season vary between 15 May and 30 June at Ferké and between 15 May and 22 July at Korhogo. Although the cumulative annual rainfall has increased over the period 1989-2018, the consecutive rainy days (CWD) index has decreased. The temperature parameters are increasing over the study period. The correlation matrix supported by linear regression confirms that the number of days in the year with rainfall ≥ 20 mm (R20 mm index) negatively influences yield.

Keywords : climatic extremes, sugar cane, Côte d'Ivoire, R-Studio, SUCAF-CI.