



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0293/2020

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0416000226

LABORATOIRE :
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Physique-Chimie Appliquée

Option : Environnement

THEME :

**APPLICATION DE L'INDICE SPI POUR LA
CARACTERISATION DE LA SECHERESSE DANS
LA ZONE DE LAMTO (CÔTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

DOUMBIA Mamadou

JURY

Président : M. BARIMA Yao Sadaïou Sabas, Maître de Conférences,

Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa

Directeur : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Maître de Conférences,

Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa

Encadreur : M. YOROBA Fidèle, Maître-Assistant,

Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan

Examineur : M. KOUASSI Adjon Anderson, Maître-Assistant,

Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa

Soutenu publiquement
le : 09/12/2020

TABLE DES MATIERES

	Page
TABLE DES MATIERES.....	i
DEDICACES.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	vi
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : GENERALITES.....	5
1.1 Caractéristiques physique de la zone d'étude.....	5
1.1.1 Présentation de la zone d'étude	5
1.1.2 Régime climatique	5
1.1.3 Géomorphologie	6
1.1.4 Végétation.....	6
1.2 Variabilités climatiques.....	7
1.2.1 Circulation atmosphérique dans la haute atmosphère	7
1.2.2 Circulation atmosphérique dans les basses couches	7
1.2.3 Définition de la variabilité climatique	8
1.2.4 Causes de la variabilité climatique	8
1.2.5 Effets de la variabilité climatique	9
1.3 Sécheresse	10
1.3.1 Définition.....	10
1.3.2 Types de sécheresses	10
1.3.3 Relation entre les différents types de sécheresse	11
1.3.4 Conséquences de la sécheresse	12
1.3.5 Indices de caractérisation de la sécheresse	13
PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES	7
2.1 Matériel.....	17
2.1.1 Données	17
2.1.2 Logiciels	17
2.2 Méthodes.....	18
2.2.1 Indice Standardisé des Précipitations (SPI).....	18
2.2.2 Anomalies normalisées	21

2.2.3	Diagramme ombrothermique.....	21
PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....		22
RESULTATS		23
3.1	Variabilité temporelle du climat	23
3.1.1	Variabilité annuelle.....	23
3.1.2	Variabilité interannuelle	26
3.2	Variations temporelles des indices SPI.....	29
3.2.1	Évaluation de la variabilité temporelle de l'indice SPI sur 1 mois.....	29
3.2.2	Évaluation de la variabilité temporelle de l'indice SPI sur 3 mois.....	31
3.2.3	Évaluation de la variabilité temporelle de l'indice SPI sur 12 mois.....	33
3.3	Tendance climatologique à partir de l'indice SPI.....	34
3.3.1	Evaluation de la tendance climatologique du SPI sur 1 mois.....	34
3.3.2	Evaluation de la tendance climatologique du SPI sur 3 mois.....	36
3.3.3	Evaluation de la tendance climatologique du SPI sur 12 mois.....	37
DISCUSSIONS		39
CONCLUSION GENERALE		40
REFERENCES.....		40

DEDICACES

Je dédie ce travail en signe de reconnaissance à :

Mon défunt père,
Ma chère mère qui m'a toujours encouragé,
Toute ma famille.

REMERCIEMENTS

Un mémoire est avant tout un travail de réflexion collective. A ce titre, il est judicieux de remercier sincèrement toutes les personnes qui ont participé à sa réalisation.

Je remercie les autorités de l'Université Jean Lorougnon Guédé, avec à leur tête le Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epouse KONE, présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, pour leur dévouement dans la formation des étudiants.

Mes chaleureux remerciements sont adressés aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail et aux rapporteurs pour leur contribution à l'amélioration de sa qualité.

J'adresse mes profonds remerciements au Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement, Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur scientifique de ce mémoire pour sa disponibilité, sa patience et son encouragement.

J'adresse mes sincères remerciements au Professeur DIAWARA Adama, Directeur de la Station Géophysique de Lamto (SGL) pour m'avoir permis de mener à bien mon stage dans sa structure.

Je tiens à exprimer, toute ma gratitude à mon encadreur Docteur YOROBA Fidèle, de l'Université Felix Houphouët-Boigny qui m'a non seulement accordé sa confiance mais aussi apporté son soutien indéfectible. Ses conseils d'ordre scientifique, ses orientations objectives ont aidé à l'aboutissement de ce mémoire de master.

Je remercie sincèrement Docteur SEKA Simplicie Kouassi, Responsable des mémoires de master, pour son soutien moral et matériel pour le bon déroulement de ce mémoire.

Je ne saurais oublier le Docteur KOUASSI Adjon Anderson pour sa disponibilité, ses orientations et le partage de ses expériences professionnelles respectives qui ont contribuées à l'aboutissement de ce travail.

Toute ma reconnaissance à M. TIEMOKO Touré Dro et M. YAPO Martial, doctorants de l'équipe du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des fluides (LAPA-MF) de l'Université Felix Houphouët-Boigny, pour leur participation et formation actives à l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'endroit de tout le personnel de la Station Géophysique de Lamto, particulièrement Docteurs KOUASSI Benjamin, KOUADIO Kouakou,

OUATTARA Yacouba, chercheurs associés, M. FOFANA Issouf, assistant du directeur, Monsieur Ismaël KONATE et Mme KI Adja observateurs, M. COULIBALY Abdoulaye technicien et M. YAPO chauffeur pour leurs collaboration et soutien.

J'adresse mes sincères remerciements à l'ensemble des enseignants de l'Université Jean Lorougnon Guédé, plus particulièrement ceux de l'UFR environnement pour la formation qu'ils m'ont dispensée durant tout mon parcours universitaire.

Je remercie également toutes les personnes que je n'ai pas pu citer, qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail, en particulier DRABO Souleymane, SALIFOU Ibrahim, SOUMAHORO Aboulaye, CISSE Moussa et ZOURE Moussa.

Enfin mes remerciements vont à l'endroit de mes amis de la promotion de master 2 physique-chimie 2019-2020, que ce diplôme nous ouvre de meilleurs débouchés dans le monde de l'emploi.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

- CO₂ : Dioxyde de carbone
- GES : Gaz à Effet de Serre
- FIT : Front InterTropical
- HE : Humidité Extrême
- HS : Humidité Sévère
- HM : Humidité Modérée
- HL : Humidité Légère
- SE : Sécheresse Extrême
- SS : Sécheresse Sévère
- SM : Sécheresse Modérée
- SL : Sécheresse Légère
- ZCIT : Zone de Convergence InterTropicale
- SPI : Indice de Précipitation Standardisé

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone de Lamto	5
Figure 2 : Relation entre les différents types de sécheresse et leur intensité croissante.	12
Figure 3 : Interface de calcul du logiciel SPI Generator	18
Figure 4 : Cycles annuels moyens des précipitations et des températures mensuelles et leurs anomalies normalisées	23
Figure 5 : Diagramme ombrothermique moyen sur la période 1964-2019 à Lamto.....	25
Figure 6 : Évolutions interannuelles de la pluviométrie sur la période 1964-2019.....	26
Figure 7 : Évolution interannuelle des anomalies normalisées sur la période 1964- 2019 à Lamto.....	27
Figure 8 : Évolutions des moyennes interannuelles des précipitations et des températures mesurées à Lamto sur la période 1964-2019.	28
Figure 9 : Evolutions mensuelles de l'indice SPI sur 1 mois sur la période 1964-2019.....	30
Figure 10 : Evolutions mensuelles de l'indice SPI sur 3 mois sur la période 1964-2019.....	31
Figure 11 : Evolution mensuelles de l'indice SPI de 12 mois sur la période 1964-2019.....	34
Figure 12 : Fréquences des classes de sécheresse et d'humidité à partir de SPI sur 1 mois ...	35
Figure 13 : Fréquences des classes de sécheresse et d'humidité à partir de SPI sur 3 mois. ..	37
Figure 14 : Fréquences des classes de sécheresse et d'humidité à partir de SPI sur 12 mois .	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	: Différents types d'indicateurs de sécheresse	13
Tableau II	: Tableau de classification des séquences de sécheresse en fonction des valeurs SPI	20
Tableau III	: Nombre d'apparition des périodes humide et sèche avec leur probabilité d'occurrence de SPI sur 1 mois.	35
Tableau IV	: Nombre d'apparition des périodes humide et sèche avec leur probabilité d'occurrence de SPI sur 3 mois à Lamto.	36
Tableau V	: Nombre d'apparition des périodes humide et sèche avec leur probabilité d'occurrence de SPI sur 12 mois.	38

INTRODUCTION

Le changement climatique est devenu depuis ces dernières décennies une préoccupation majeure pour la communauté scientifique en général et pour les États en particulier à cause de ses effets d'échelles spatiales et temporelles variées (GIEC, 2013). Ces effets sont entre autres, la distribution irrégulière de la pluviométrie, l'augmentation croissante de la température et l'intensification de l'effet de serre. Ils touchent ainsi un grand nombre de secteurs d'activités tels que l'économie, l'agriculture, la santé et le transport (Saley *et al.*, 2009).

Cette variation climatique à long terme, dans le cas de l'Afrique de l'ouest, s'exprime en grande partie par un déficit et des irrégularités spatiale et temporelle des précipitations (Hubert *et al.*, 1989). En effet, les pays de l'Afrique de l'ouest (Sénégal, Mali, Niger, Côte d'Ivoire, etc.) ne sont pas en marge de cet état du climat. Ils ont tous connu autour des années 1970 un déficit pluviométrique qui a entraîné un dérèglement du calendrier agricole, une perte de la production, une perte du cheptel et l'apparition des sécheresses plus ou moins longues (Nicholson, 1980 ; Servat *et al.*, 1999).

Dans le cas de la Côte d'Ivoire, les effets se sont manifestés plus particulièrement sur le rendement agricole (Kassin *et al.*, 2008 ; Kanohin *et al.*, 2012 ; Yoroba *et al.*, 2019), sur les ressources hydriques disponibles (Goula *et al.*, 2006) et les conditions météorologiques locales (Diawara *et al.*, 2014). En effet, les travaux de Diawara *et al.* (2014) ont montré que la zone de Lamto est caractérisée par un climat subhumide. Ce climat peut varier pour devenir un climat humide ou aride pendant des années particulières. Ces auteurs soulignent également l'apparition d'un déficit pluviométrique au début des années 70 qui s'est étendue aux années 1993 et 1994. En réalité, cette longue période de sécheresse apparente n'est rien d'autre qu'une extension spatiale de la sécheresse particulièrement marquée (durée et intensité) entre 1970 et 1990 survenue dans la région du Sahel (Nicholson & Palao, 1993 ; Paturel *et al.*, 1995 ; Barbé & Lebel, 1997). Par ailleurs, les travaux réalisés par Moral (1964) et Diawara *et al.* (2014) ne permettent pas de caractériser objectivement les périodes de sécheresse dans la zone de Lamto et pourtant elles se font ressentir à travers les pertes de productions agricoles, la diminution des ressources hydriques etc. En effet, au-delà d'un déficit pluviométrique par rapport à une moyenne calculée sur un certains nombres d'années d'observations et rapporté par ces auteurs, une sécheresse se manifeste avant tout par le fait que la végétation, cultivée ou spontanée, n'a pu arriver normalement à maturité (Bernus & Savonnet, 1973). Un total annuel de précipitations déficitaires ne suffit donc souvent pas à expliquer de mauvaises récoltes ou l'absence de pâturages qui constituent même la signature de la sécheresse. Pour améliorer donc le suivi climatologique de ces sécheresses à Lamto, cette étude utilise l'indice de précipitation

standardisée SPI (McKee *et al.*, 1993 ; 1995) sur la période 1964-2019. Leur caractérisation à partir de l'indice SPI est recommandée par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) pour analyser les périodes humides ou sèches. En effet, depuis 2009, l'OMM préconise d'utiliser principalement le SPI pour surveiller l'évolution des conditions de sécheresse pour diverses échelles de temps (Hayes, 2011) afin d'améliorer le niveau d'alerte précoce de la sécheresse et d'en évaluer la gravité. L'indice SPI s'applique à tous les régimes climatiques et peut être comparé dans des climats très différents. Il peut être utilisé dans les régions pour lesquelles les données sont incomplètes mais aussi pour lesquelles on manque de jeux de données homogènes à long terme.

Cette étude pourrait constituer un outil d'aide à la prise de décisions pour déterminer et caractériser les séquences de la sécheresse dans la zone de Lamto sur la période 1964-2019.

Il s'agira alors de :

- analyser la variabilité temporelle de la pluviométrie locale ;
- analyser l'évolution des sécheresses météorologiques, agricoles et hydrologiques ;
- quantifier leurs fréquences et probabilités d'occurrence.

Le travail est divisé en trois grandes parties. D'abord, la première partie est une étude générale de la caractérisation physique de la zone de Lamto et de la sécheresse. Ensuite, La seconde partie présente les données et les méthodes utilisées. Enfin, dans la dernière partie, nous analysons et discutons les résultats obtenus.

PARTIE 1 : GENERALITES

1.1 Caractéristiques physique de la zone d'étude

1.1.1 Présentation de la zone d'étude

La zone de Lamto ($5,023^{\circ}\text{W}$; $6,13^{\circ}\text{N}$) est localisée dans la zone du V-Baoulé en Côte d'Ivoire (Figure 1). Elle est constituée de forêts et collines comprenant 80% de savane humide et 20% de forêt avec une superficie globale de 27 Km² et borde la forêt tropicale du Sud (Diawara *et al.*, 2014).

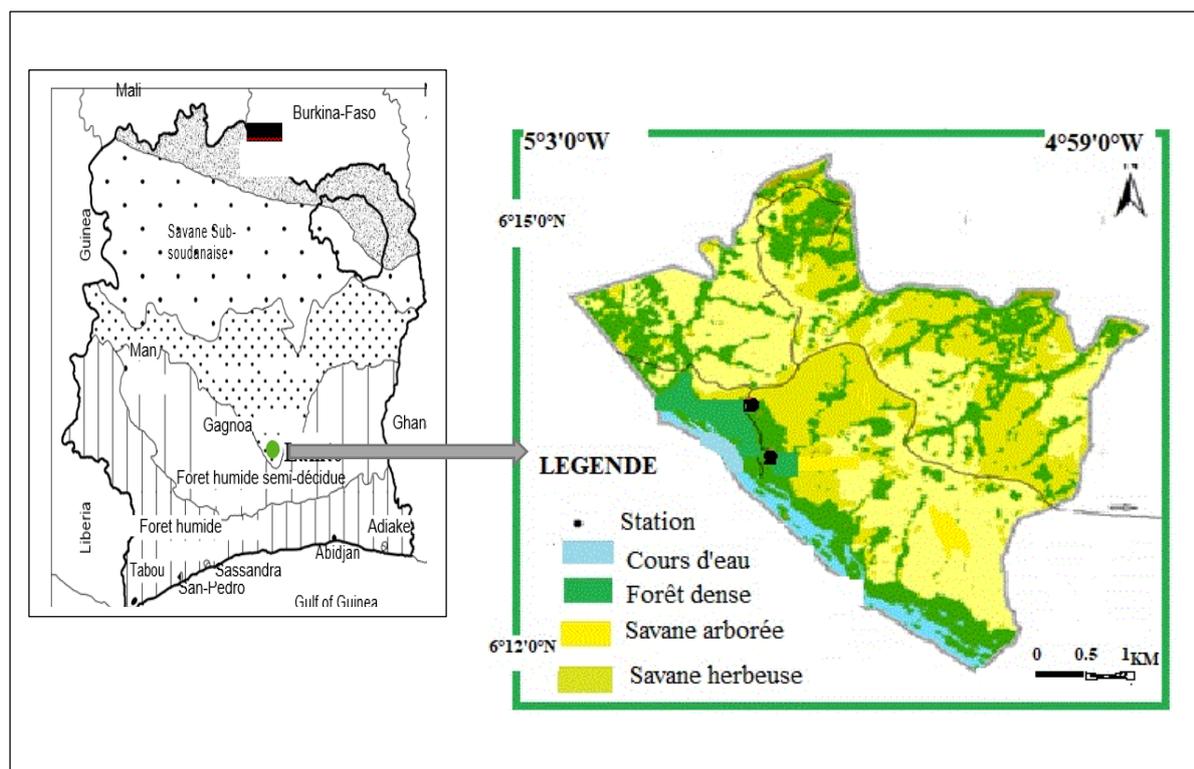


Figure 1 : Localisation de la zone de Lamto

1.1.2 Régime climatique

Deux facteurs essentiels (température et précipitation) déterminent les conditions climatiques dans la zone de Lamto. La température est constamment élevée et les variations saisonnières sont faibles, avec des moyennes journalières comprises entre 24 et 30° en saison sèche, et entre 23 et 28° en saison humide (Lamotte, 1967).

Le régime pluviométrique de la région comporte 4 saisons (Yoboué, 1991 ; Diawara *et al.*, 2014) réparties comme suite :

- une grande saison des pluies entre Mars-Juillet ;
- une petite saison sèche au mois d'Août ;
- une petite saison pluvieuse en Septembre-Novembre ;
- une grande saison sèche de Décembre à Février.

La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 1200 mm. Les activités socio-économiques de la région sont particulièrement centrées sur l'agriculture, la pêche et l'élevage.

La végétation de Lamto, composée essentiellement de savane arborée et forêt jonchant le fleuve Bandama et nombreux marigots, lui confère un climat dit de transition entre le climat équatorial et le climat tropical Diawara *et al.* (2014). Spécifiquement, les travaux de ces auteurs ont montré que le climat de Lamto est subhumide et quelque fois peut varier à humide ou à aride pour des années exceptionnelles.

1.1.3 Géomorphologie

Le modèle du paysage de Lamto est dans l'ensemble très doux. La réserve est partagée entre les bassins versants du N'zi, assez éloignés et du Bandama assez proches, qui constituent sa limite au Sud-ouest (Gautier, 2014).

Conséquemment, les pentes du premier bassin sont bien moindres que celles du second, lesquelles ne dépassent pas 15%. Le sous-sol de la réserve est essentiellement granitique. Son altération donne un matériel quartzeux évoluant vers des sols très sableux, du type ferrugineux tropical. En haut de pente et le long des versants, le sol, sableux en surface, devient en profondeur une texture sablo-limoneuse qui précède un horizon gravillonnaire (Gautier, 2014). Sa profondeur est de l'ordre de 2 m. Dans les bas-fonds, les sols sont uniquement sableux, très profonds (profondeur supérieure à 2 m). Ils montrent une hydromorphie temporaire en surface et permanente en profondeur. A proximité des affleurements rocheux, on trouve des sols beaucoup moins profonds, de structure uniquement sableuse.

1.1.4 Végétation

Dans l'ensemble des mosaïques que l'on rencontre dans le V-Baoulé, les éléments forestiers cloisonnent les savanes en formant des galeries le long des cours d'eau temporaires. Ces rubans vont en s'épaississant lorsqu'on se rapproche des cours des fleuves qui sont bordés d'une forêt tropicale relativement large. Ces formations bénéficient d'une humidité édaphique qui a permis leur installation et leur subsistance. La végétation de Lamto est composée essentiellement de savane arborée et forêt jonchant le fleuve Bandama et de nombreux marigots (Diawara *et al.*, 2014). La proportion des surfaces forestières et savaniennes dans la mosaïque du centre du pays est très variable. Au Nord, les forêts de plateau disparaissent en faisant place à des savanes boisées ou à des forêts claires. Inversement, à proximité des grands massifs forestiers, leur importance s'accroît jusqu'à ce qu'elles deviennent jointives çà et là avec des forêts galeries, ceinturant les savanes qu'on qualifie alors d'inclus.

1.2 Variabilités climatiques

1.2.1 Circulation atmosphérique dans la haute atmosphère

La circulation atmosphérique se caractérise par le mouvement à l'échelle planétaire des différentes masses d'air entourant la terre, ce qui redistribue l'énergie solaire en conjonction avec la circulation océanique. Par ailleurs, la circulation régionale en Afrique de l'Ouest est principalement caractérisée par différents régimes de vents zonaux (Jet d'Est Africain, Jet d'Est Tropical et Jet d'Ouest Subtropical) en moyenne Troposphère (Saha & Saha, 2001). En effet, cette circulation d'est est constituée du Jet d'Est Africain (JEA) se manifestant autour de 650hPa, du Jet d'Est Tropical (JET) autour de 200hPa et enfin du Jet d'Ouest Subtropical (JOST) (Fontaine & Janicot, 1992). Leurs rôles dans le système de Mousson africaine ont fait l'objet d'intérêt (Janicot *et al.*, 1998 ; Sultan, 2002 ; Sultan & Janicot, 2003). Cependant, à cette circulation, se superposent les ondes d'Est Africaines (Diedhiou *et al.*, 1999).

1.2.2 Circulation atmosphérique dans les basses couches

Le bilan radiatif net (différence entre le flux solaire et le flux infrarouge) est un facteur qui définit le climat. La répartition de ce bilan radiatif n'est pas uniforme sur l'ensemble du globe terrestre. Alors que il est nécessaire qu'il y ait des transferts énergétiques des régions excédentaires vers les régions déficitaires pour assurer un équilibre. Les transferts énergétiques dans les zones intertropicales se font par des circulations stables. Dans cette circulation, le flux de basse couche met en relation deux masses d'air (Alizé boréal ou Harmattan et Alizé austral ou Mousson) de direction et de caractéristique opposées (Fontaine *et al.*, 2009). La mousson est une masse d'air océanique chargé d'humidité issus de l'anticyclone de Sainte-Hélène de direction Sud-ouest tandis que le Harmattan est une masse d'air chaud et sec de direction Nord-Est originaire des vents venant du Sahara. La zone d'ascendance vers laquelle convergent les flux d'énergie des basses couches est appelée la zone de convergence intertropicale (ZCIT) dont la trace au sol constitue une zone frontale appelée Front Intertropicale (FIT). La circulation des différentes masses d'air précédentes dans les régions ouest africaines est le principal facteur qui caractérise les saisons climatiques au cours de l'année, c'est-à-dire le passage de la ZCIT sur les diverses régions correspond aux différentes saisons de pluie que connaissent les zones intertropicales (Bielli *et al.*, 2009).

1.2.3 Définition de la variabilité climatique

Les données climatiques permettent l'étude des différents phénomènes (variation de la pluviométrie, augmentation de la température, effet de serre, etc.) qui s'avèrent naturels durant une courte période au cours d'une année. Ils peuvent se produire dans n'importe quel régime climatique du monde. Parfois, le phénomène se prolonge toute une saison, ou au cours d'une période plus longue de façon considérable et varie avec un seuil différent de la normale. Cette variation à long terme peut avoir des effets significatifs sur l'environnement et la population. Alors ce changement de tendance peut être caractérisé de variation climatique. La variation climatique devient presque l'origine de la majorité des impacts et aléas naturels. Ce phénomène principalement lié aux émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, ne s'écarte pas parmi les facteurs déclencheurs et ou facilitateurs de l'ampleur de la sécheresse.

1.2.4 Causes de la variabilité climatique

La planète fait face à un phénomène de variabilité ou changement climatique sans précédent à l'échelle historique. Le phénomène de changement climatique a des conséquences dramatiques et les causes peuvent être liées à des phénomènes naturels et anthropiques, c'est-à-dire les activités humaines (CCNUCC, 1992).

1.2.4.1 Causes naturelles

La Terre est un système solaire qui est composée d'une atmosphère. L'atmosphère est un milieu complexe, dynamique et sensible qui est régi par des phénomènes physiques et chimiques. Elle se trouve donc dans des conditions d'équilibre thermodynamique. Son maintien dans ces conditions résulte de processus naturels. Des phénomènes naturels peuvent alors contribuer de façon directe ou indirecte aux déséquilibres de la terre en modifiant le bilan radiatif de la planète (GIEC, 2013). Ces phénomènes naturels sont :

- le rayonnement solaire ;
- les éruptions volcaniques ;
- les aérosols désertiques et océaniques ;
- la combustion de la biomasse ;
- les embruns marins ;
- les vents violents.

1.2.4.2 Causes anthropiques

Le début du XIXème siècle a été l'ère de la révolution scientifique. Cette découverte scientifique a favorisé la croissance rapide de la révolution industrielle. L'un des facteurs majeurs de cette évolution est l'invention de la machine à vapeur qui utilise des combustibles fossiles. Ces machines vont contribuer à la pollution de l'atmosphère par la production des gaz à effet de serre tels que :

- l'émission du CO₂ par les industries ;
- la fumée d'échappement des véhicules ;
- l'émission du méthane par les produits agricole et de l'oxyde nitreux.

1.2.5 Effets de la variabilité climatique

Les incidences possibles des phénomènes de changement climatique peuvent être de façon sociale et économique. On distingue :

- la destruction de la couche d'ozone ;
- l'augmentation de la température ;
- augmentation de l'activité cyclonique intense ;
- diminution des précipitations ;
- une fréquence de plus en plus grande des périodes de sécheresse ;
- la hausse du niveau de la mer par l'effondrement des glaces ;
- l'occurrence et l'intensité de plus en plus grande des inondations ;
- la dégradation des sols ;
- risque accru de mortalité par l'effet de la chaleur ;
- risque accru de pénurie d'aliments et d'eau, de malnutrition, de maladies d'origine hydrique et alimentaire ;
- perturbation des établissements humains, du commerce, des transports et de l'organisation sociale lors des inondations, pressions sur l'infrastructure urbaine et rurale, pertes matérielles ;
- progression de la sécheresse.

1.3 Sécheresse

1.3.1 Définition

La sécheresse est une composante du climat normal et elle se produit dans plusieurs régimes climatiques dans le monde (les déserts, les forêts tropicales, etc.) (OMM, 2012). De plus, elle se définit comme un état de déficit des disponibilités en eau qui se prolonge par rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée et dans une région déterminée ou dans un secteur de l'environnement.

La notion de sécheresse varie du point de vue d'un utilisateur à l'autre suivant qu'il s'agit d'un météorologue, d'un exploitant agricole, d'un opérateur de centrale hydro-électrique. Au sein d'un seul et même secteur, la sécheresse peut aussi être perçue en fonction de divers points de vue, puisque ses effets peuvent présenter des différences bien marquées. Les sécheresses sont habituellement classées par type (météorologique, agricole et hydrologique) et diffèrent entre elles en fonction de leur intensité, de leur durée et de leur couverture spatiale (ONERC, 2018).

Les paramètres importants qui permettent de caractériser la sécheresse sont : l'intensité, la durée et l'étendue spatiale. Les définitions de ces paramètres peuvent parfois prêter à confusion, du fait de l'ambiguïté de l'utilisation de ces termes.

- **Intensité** : Elle est généralement mesurée par l'écart par rapport à la normale d'une des variables de la sécheresse pendant une durée fixée;
- **Durée** : Elle peut être de l'ordre de semaines, mois jusqu'à des années.
- **Position absolue dans le temps** : il s'agit du début et de la fin de la sécheresse. Leurs déterminations peuvent être assez difficiles et dépendent des seuils choisis selon l'utilisation ;
- **Surface touchée par la sécheresse** : Les épïcètres, c'est-à-dire les zones d'intensité maximale peuvent se déplacer d'une saison ou d'une année à une autre. Souvent, cette surface est plus vaste que celle affectée par les autres catastrophes naturelles;
- **Magnitude** : c'est le cumul de déficit d'eau (par exemple : précipitations) en dessous d'un certain seuil durant un événement de sécheresse.

1.3.2 Types de sécheresses

La sécheresse est aussi définie selon les besoins d'utilisation en eau des différents secteurs qui interagissent avec ses effets. On définit donc une sécheresse du point de vue météorologique, hydrologique, agricole ou socio-économique (FAO, 1996).

1.3.2.1 Sècheresse météorologique

La sécheresse météorologique est un déficit prolongé de précipitations qui est basée sur le degré d'aridité d'une période sèche par rapport à la normale (médiane ou moyenne) et sur la durée de cette période sèche. Cette définition doit être considérée spécifique à une région puisque les conditions météorologiques normales changent grandement d'une région à l'autre.

1.3.2.2 Sècheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique se manifeste par des niveaux anormalement bas des lacs, rivières, nappes souterraines, fleuves, lagune etc. Elle dépend des précipitations mais aussi de l'état du sol influant sur le ruissellement et l'infiltration. La sécheresse hydrologique est causée par un manque de précipitations accompagné d'une évaporation massive et importante. Cependant, des facteurs non météorologiques, comme la demande en eau, la disponibilité de réservoirs de surface et le forage de puits artésiens, en aggravent l'effet (OMM, 2006). Le réseau hydrographique détermine les temps de réponse aux déficits de précipitations observés sur différentes périodes.

1.3.2.3 Sècheresse agricole

La sécheresse agricole est un rapport entre les caractéristiques des sécheresses météorologiques ou hydrologiques et les impacts sur le milieu agricole. Elle se caractérise par un déficit en eau des sols superficiels (entre 1 et 2 m de profondeur), suffisant pour altérer le bon développement de la végétation (OMM, 2012). Elle dépend des précipitations et tient compte de l'évaporation des sols et de la transpiration des plantes (l'eau puisée par les racines est évaporée au niveau des feuilles). La sécheresse agricole est donc sensible aux précipitations, à l'humidité et à la température de l'air, au vent mais aussi à la nature des plantes et des sols.

1.3.3 Relation entre les différents types de sécheresse

La relation entre les types de sécheresse peut être représentée par la Figure 2. La sécheresse socio-économique définit le lien entre l'offre et la demande d'un bien économique et certains éléments des sécheresses météorologiques, hydrologiques ou agricoles. Elle diffère fortement des autres types de sécheresse qui sont tributaires des précipitations (OMM, 2006). Il y a alors sécheresse socio-économique lorsque la demande pour un bien excède l'offre à cause d'un manque hydrique relié au climat.

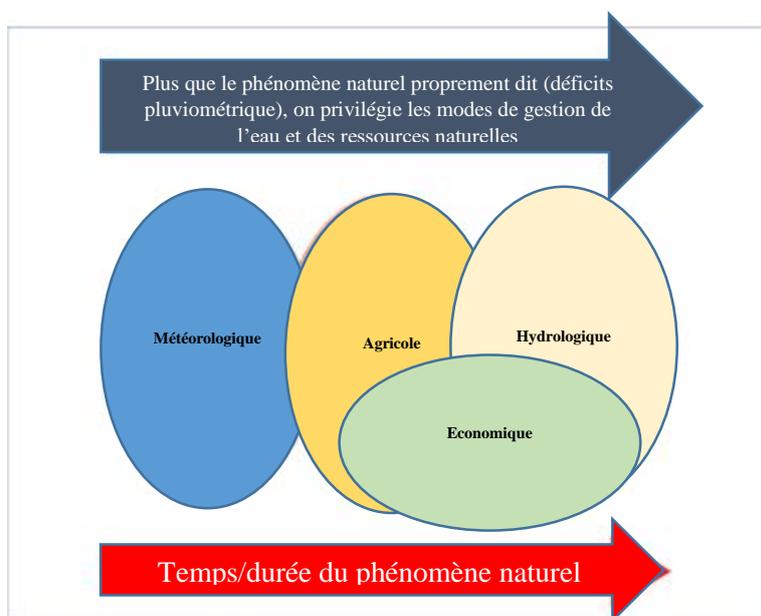


Figure 2 : Relation entre les différents types de sécheresse et leur intensité croissante

1.3.4 Conséquences de la sécheresse

La sécheresse se manifeste par une modification du régime des précipitations et par une diminution des hauteurs annuelles. Celle-ci peut avoir des conséquences dans plusieurs secteurs d'activités.

- ✓ Conséquences sociales
 - La limitation des usages (arrosage des jardins, lavage des voitures, arrosage des terrains de sport) par les autorités peut engendrer des conflits d'usage importants sur les secteurs qui dépendent des ressources en eau pour leur fonctionnement
 - Augmentation du taux de chômage
- ✓ Conséquence sur la sante
 - la malnutrition
 - l'accroissement de la mortalité
- ✓ Conséquences économiques
 - baisse de la production de l'énergie hydro-électrique par réduction importante des débits des cours d'eau (fleuves, lacs etc.).
 - fermeture des industries lieux de fortes consommations d'eau
 - baisse de production agricole

- baisse des matières premières

1.3.5 Indices de caractérisation de la sécheresse

Une approche globale et intégrée est nécessaire pour assurer un meilleur suivi de la sécheresse et diffuser des alertes précoces. Un système d'alerte précoce à la sécheresse vise généralement à suivre, évaluer et fournir des informations pertinentes concernant les conditions et les tendances climatiques, hydrologiques et d'approvisionnement en eau (OMM, 2006).

Les efforts déployés dernièrement dans ce domaine aux États-Unis d'Amérique et dans d'autres pays ont permis de mettre au point de nouveaux outils ou indicateurs de sécheresse et de nouvelles méthodes d'alerte précoce et d'aide à la décision qui faciliteront la planification des mesures de préparation à la sécheresse et l'élaboration de politiques appropriées en la matière (McKee *et al.*, 1993).

Les indices de sécheresse sont des paramètres liés à la précipitation, la température, aux débits des cours d'eau, au niveau des eaux souterraines et des réservoirs, l'humidité du sol, aux manteaux neigeux, etc., utilisés pour décrire les conditions de sécheresse.

Tableau I : Différents types d'indicateurs de sécheresse

Types des indices de sécheresse	Indices
Indices météorologiques	<ul style="list-style-type: none"> - SPI (Standardized Precipitation Index) - PDSI (Palmer Drought Severity Index) - CMI (Crop Moisture Index) - SWSI (Surface Water Supply Index)
Indices hydrologiques	<ul style="list-style-type: none"> - Ground water levels - Low flow characteristics
Indices agricoles	<ul style="list-style-type: none"> - Moisture reserve - Expected yields of plants

1.3.5.1 Indice PDSI (Palmer Drought Severity Index)

Cet indice mesure la différence d'approvisionnement en humidité pour les phases sèches autant que pour les phases humides. Il est calculé pour des périodes hebdomadaires ou mensuelles afin de caractériser les conditions régionales (Nathan *et al.*, 2004). Étant donné que ces indicateurs sont normalisés, il est possible de comparer différentes régions.

L'indice s'exprime par la relation ci-dessous :

$$PDSI = X(i) = 0,897X(i - 1) + Z(i)/3 \quad (1)$$

Où : $X(i - 1)$ est le PDSI de la période précédente, $Z(i)$ l'indice de l'anomalie d'humidité et i le mois de l'année.

On note : $Z(i) = K(P - P_c)$ où K est un facteur de poids, P la précipitation mensuelle actuelle (mm) et P_c la précipitation mensuelle climatiquement adaptée aux conditions existantes.

$$P_c = \alpha_j PE + \beta_j PR + \gamma_j PRO - \delta_j PL \quad (2)$$

Où : $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ et δ_j représentent les coefficients climatiques mensuels, PE est l'Evapotranspiration Potentielle, PR est la Recharge Potentielle du sol, PRO est le Ruissellement Potentiel et PL est la Perte potentielle dans le sol.

L'inde PDSI utilise, en plus des précipitations et de la température de l'air, l'humidité contenue dans le sol (Aiguo *et al.*, 2004). Toutefois, cet indice ne tient pas compte des ressources hydrologiques de surface pouvant influencer les conditions de sécheresse, comme les cours d'eau, les réservoirs, la couverture neigeuse ou le gel du sol. Il ne tient pas compte non plus des changements pouvant survenir dans l'utilisation des ressources en eau.

1.3.5.2 Indice CMI (Crop Moisture Index)

C'est un indicateur météorologique qui donne l'état de l'humidité disponible par rapport à la demande. Développé à partir des théories de l'indice PDSI, l'indice CMI définit les périodes sécheresses en fonction de la magnitude et du déficit en évapotranspiration (Palmer, 1968).

Son expression est donnée par la relation suivante :

$$CMI = EAI + WI \quad (3)$$

Où : WI (Wetness Index) est la recharge du sol (Précipitation) combinée au ruissellement (mm) et EAI est l'indice d'anomalie de l'évapotranspiration. Avec : $EAI = 0,67Y_{i-1} + 1,8 \frac{ET - ET_c}{\sqrt{\alpha}}$

Où Y_{i-1} est le CMI de la semaine précédente, ET l'évapotranspiration, ET_c l'évapotranspiration attendue pour les conditions qui prévalent et α le coefficient d'évapotranspiration.

L'indice CMI utilise la température moyenne et les précipitations totales hebdomadaires comme intrants, en plus de la valeur du CMI de la semaine précédente pour évaluer les conditions agricoles.

1.3.5.3 Indice SWSI (Surface Water Supply Index)

Cet indicateur hydrologique, est un indicateur complémentaire à l'indice PDSI qui tient compte des facteurs hydrologique et climatologique (Garen, 1993). Son expression est la suivante :

$$SWSI = \frac{[(a*PN_{sp})+(b*PN_{cpc})+(c*PN_{rs})-50]}{12} \quad (4)$$

Où a, b, c sont les poids associés à chaque composante avec a+b+c=1

sp est la couverture neigeuse équivalent en eau (mm), cpc est la précipitation (mm), rs le réservoir (mm) et PN la probabilité de ne pas excéder (%).

L'indice SWSI est un indice normalisé qui permet de comparer différentes régions, généralement pour des périodes mensuelles. C'est un indicateur des conditions hydriques spécialement développé pour les régions où la fonte des neiges est la principale source d'écoulement des eaux superficielles. Il tient compte de la couverture neigeuse, des précipitations mensuelles en montagne, des cours d'eau, du contenu des réservoirs en plus du contenu en eau du sol. Cet indice ne tient toutefois pas compte des écoulements dus à la fonte d'une accumulation antérieure de neige. C'est un indicateur des conditions de surface calibré pour une région homogène et n'est pas conçu pour de grandes variations topographiques. L'indice SWSI est simple à calculer et donne une mesure de l'approvisionnement en eau superficielle.

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel

2.1.1 Données

La base de données météorologiques utilisées dans cette étude est une série longue et complète de 56 années, composée de la température de l'air (°C), de la précipitation (mm), de l'humidité relative, de l'insolation etc. mesurées quotidiennement au sol à la Station Géophysique de Lamto depuis 1962. La série temporelle utilisée ici s'étend de 1964 à 2019 et concerne seulement la précipitation et la température. Ces données ont fait l'objet d'études dans un contexte de changements climatiques et impacts socio-économiques (Diawara *et al.*, 2014) mais aussi de compréhension des processus d'échanges et de transports entre la végétation et l'Atmosphère (Tiemoko *et al.*, 2020a, 2020b). Cependant, elles ne sont pas de libre accès et sont fournies sur demande.

2.1.2 Logiciels

Dans cette étude, trois logiciels ont été utilisés pour le traitement des données. Il s'agit notamment des logiciels R, Matlab et du logiciel de calcul de SPI (SPI Generator).

2.1.2.1 Logiciel de calcul de SPI (SPI Generator)

L'application SPI Generator sert à générer des données SPI (Indice Normalisé de Précipitation). L'application lit les données de précipitations (quotidiennes, hebdomadaires et mensuelles) et prend en charge différentes échelles de temps et différents types de données (hebdomadaires, mensuelles). Elle produit des données SPI et, en option, des données de fréquence et de période de sécheresse. Pour le calcul du SPI, nous avons procédé au calcul préalable des moyennes mensuelles des précipitations sur toute la série, c'est-à-dire, de 1964 à 2019. Cette série de moyennes mensuelles constitue le fichier d'entrée de l'application **SPI Generator** en indiquant à l'en-tête, le nom de la station et la date du début de l'enregistrement de la série chronologique en format .txt avec séparateur espace. L'interface de calcul du logiciel est montrée à la figure 3.

- **Fréquence**

La fréquence de chaque valeur SPI est calculée et sortie par le SPI Generator dans un fichier en option indiquant la valeur SPI, le nombre d'occurrences et le pourcentage.

- **Périodes de sécheresse**

Les périodes de sécheresse sont éventuellement calculées et sorties dans un fichier. Les niveaux suivants sont utilisés pour calculer les périodes de sécheresse : -1, -1,5, -2, -2,5, -3, -

3,5, -4. Si aucune période de sécheresse n'est trouvée, un fichier est tout de même généré avec un message indiquant qu'aucune période de sécheresse n'a été trouvée.

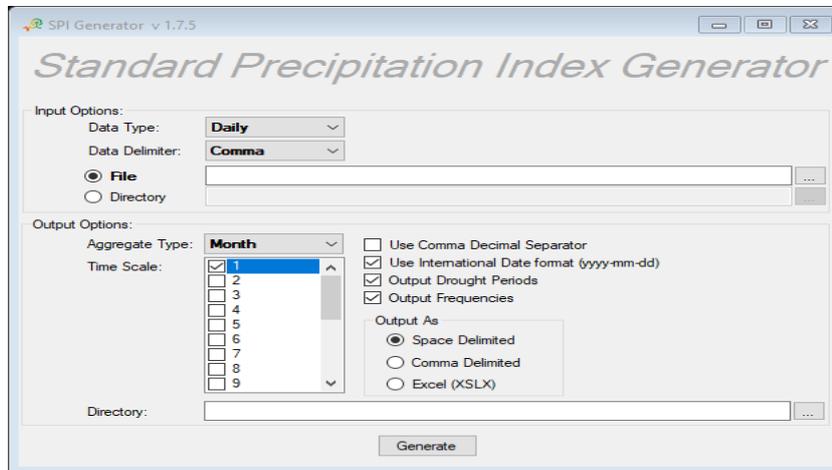


Figure 3 : Interface de calcul du logiciel SPI Generator

2.1.2.2 Logiciel R

R est un logiciel de calcul scientifique interactif libre qui possède une large collection d'outils statistiques et graphiques. Il a permis le traitement des données et traçage des graphiques.

2.1.2.3 Logiciel Matlab

Matlab est également un logiciel de calcul scientifique qui possède une large collection d'outils statistiques et graphiques. Il a permis le traçage de la courbe de tendance de Liebmann.

2.2 Méthodes

Le travail est basé sur l'analyse statistique des séquences de sécheresse à parti du SPI, en relation avec le paramètre climatique (précipitation) pour une étude de la sécheresse dans la zone de Lamto.

2.2.1 Indice Standardisé des Précipitations (SPI)

Parmi les nombreux indices d'appréciation de la sécheresse pluviométrique, l'Indice Standardisé des Précipitations (SPI) est le plus utilisé (Wu *et al.*, 2006 ; Khan *et al.*, 2008).

En effet, l'indice **SPI** a été conçu par les scientifiques américains McKee, Doesken et Kleist en 1993, pour donner une meilleure représentation de l'humidité et de la sécheresse anormales (McKee *et al.*, 1993).

Cet indice est calculé par la formule suivante :
$$SPI = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{P_j^i - \bar{P}_j}{\sigma_j} \quad (5)$$

Où P_j^i est la pluie du mois i à la station j , \bar{P}_j la pluie moyenne inter mensuelle de la station j , σ_j l'écart-type de la série des cumuls saisonniers à la station j et N_i le nombre de station du mois i .

Il a été conçu pour être un indicateur de sécheresses spatialement invariant qui reconnaît l'importance des échelles de temps dans l'analyse de la disponibilité et de l'utilisation de l'eau (Naresh *et al.*, 2009). Le SPI est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs et prend en compte la variabilité de la pluie pour des périodes définies, de préférence les plus longues possibles (OMM, 2012).

Par ailleurs, les valeurs SPI positives représentent des conditions humides ; plus le SPI est élevé, plus une période de temps est exceptionnellement humide. Les valeurs SPI négatives représentent par contre des conditions sèches ; plus le SPI est faible, plus la période est exceptionnellement sèche. Cependant, il existe un tableau de classification des valeurs de l'indice SPI pour définir l'intensité des épisodes de sécheresse. En effet, une sécheresse sévit quand l'indice présente de façon continue une valeur négative de -1,0 ou moins et se termine lorsque l'indice devient positif.

Par conséquent, on distingue pour chaque épisode de sécheresse, une durée avec un commencement et une fin, et une intensité pour chaque mois durant lequel l'épisode se poursuit. Pour obtenir ce que l'on peut appeler la «magnitude» de la sécheresse, il suffit d'ajouter toutes les valeurs de l'indice pour l'ensemble des mois sur lesquels porte l'épisode.

Aussi, l'indice SPI est utilisé pour le suivi de la sécheresse météorologique à différentes échelles de temps. Il peut être évalué pour des durées de 1, 3, 6, 12, 24, 36, 48 mois et même plus. Selon l'échelle de temps choisie, le SPI permet également le suivi de d'autres événements de sécheresse liés à la précipitation (agricole et hydrologique).

Tableau II : Tableau de classification des séquences de sécheresse en fonction des valeurs SPI (McKee *et al.*, 1993).

Valeur du SPI	Séquence de sécheresse
$2 < \text{SPI}$	Humidité extrême
$1.5 < \text{SPI} < 1.99$	Humidité sévère
$1 < \text{SPI} < 1.49$	Humidité modérée
$0 < \text{SPI} < 0.99$	Humidité légère
$0 < \text{SPI} < -0.99$	Sécheresse légère
$-1 < \text{SPI} < -1.49$	Sécheresse modérée
$-1.5 < \text{SPI} < -1.99$	Sécheresse sévère
$-2 < \text{SPI}$	Sécheresse extrême

Dans notre étude, trois échelles de temps de 1, 3 et 12 mois sont appliquées pour l'appréciation de la sécheresse à court et long termes. Ces échelles sont étroitement liées aux analyses des sécheresses météorologiques, agricoles et hydrologiques (OMM, 2012).

❖ **Avantages de la méthode SPI**

- L'indice SPI offre une bonne souplesse d'utilisation car il est possible de le calculer pour de multiples échelles de temps.
- Quand il porte sur un laps de temps relativement court, entre 1 et 3 mois par exemple, l'indice SPI permet de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité.
- L'indice SPI présente une bonne cohérence spatiale, ce qui permet d'établir des comparaisons entre des zones différentes soumises à des climats différents.
- Sa nature probabiliste le place dans un contexte historique, ce qui convient bien à la prise de décision.

❖ **Inconvénients de la méthode SPI**

- L'indice SPI ne repose que sur les relevés de précipitations.

- Le bilan hydrique du sol n'étant pas pris en compte, l'indice ne permet pas le calcul du rapport évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).

2.2.2 Anomalies normalisées

Pour l'analyse des paramètres climatologiques, nous avons procédé au calcul des moyennes mensuelles des précipitations et des températures de toute la série 1964 à 2019, en vue d'apprécier leurs évolutions au cours des différentes saisons à partir des indices d'anomalies normalisées. Cette méthode a l'avantage de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires dans une série temporelle. Aussi, l'étude de l'anomalie normalisée joue un rôle très important dans la détermination des variations saisonnières. L'anomalie d'un mois i est l'écart entre la pluie P_i du mois et la pluie moyenne (P_m) de tous les mois calculée, sur l'écart type de la série de référence considérée qui, dans la présente étude, va de 1964 à 2019. Son calcul est montré par la relation ci-dessous :

$$I = \frac{P_i - P_m}{\sigma} \quad (6)$$

Où I est l'anomalie normalisée, P_i la pluie du mois i en mm, P_m la pluie moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée et σ l'écart type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

Alors, une période normale est une période pendant laquelle une fluctuation identique s'observe de part et d'autre de l'axe des abscisses. Dans ce cas, la moyenne annuelle est sensiblement égale à la moyenne de la pluviométrie totale. Pendant la période humide, la moyenne annuelle est supérieure à la moyenne de la pluviométrie totale. Enfin, la période sèche correspond à une période où la moyenne annuelle est inférieure à la moyenne pluviométrique totale (Nicholson *et al.*, 1993).

2.2.3 Diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique est un diagramme climatique qui permet de déterminer les mois secs dans le cycle annuel. Ayant les données moyennes mensuelles des précipitations et températures, on construit sur le même graphe les courbes de précipitation (mm) et de température (°C) en ordonnée en fonction des mois (en abscisse). Par ailleurs, l'échelle de la précipitation est le double de celle de la température.

PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

RESULTATS

3.1 Variabilité temporelle du climat

3.1.1 Variabilité annuelle

La figure 4 présente les variabilités annuelles des précipitations (Figure 4.a) et celles des températures (Figure 4.c). La variabilité annuelle des anomalies normalisées des précipitations (Figure 4.b) et des températures (Figure 4.d) sont également représentées. Cette dernière variable montre un bon accord avec les évolutions des cycles annuels de la précipitation et de la température, ce qui implique qu'elle pourrait être utilisée pour étudier la variabilité des précipitations et des températures de la zone de Lamto.

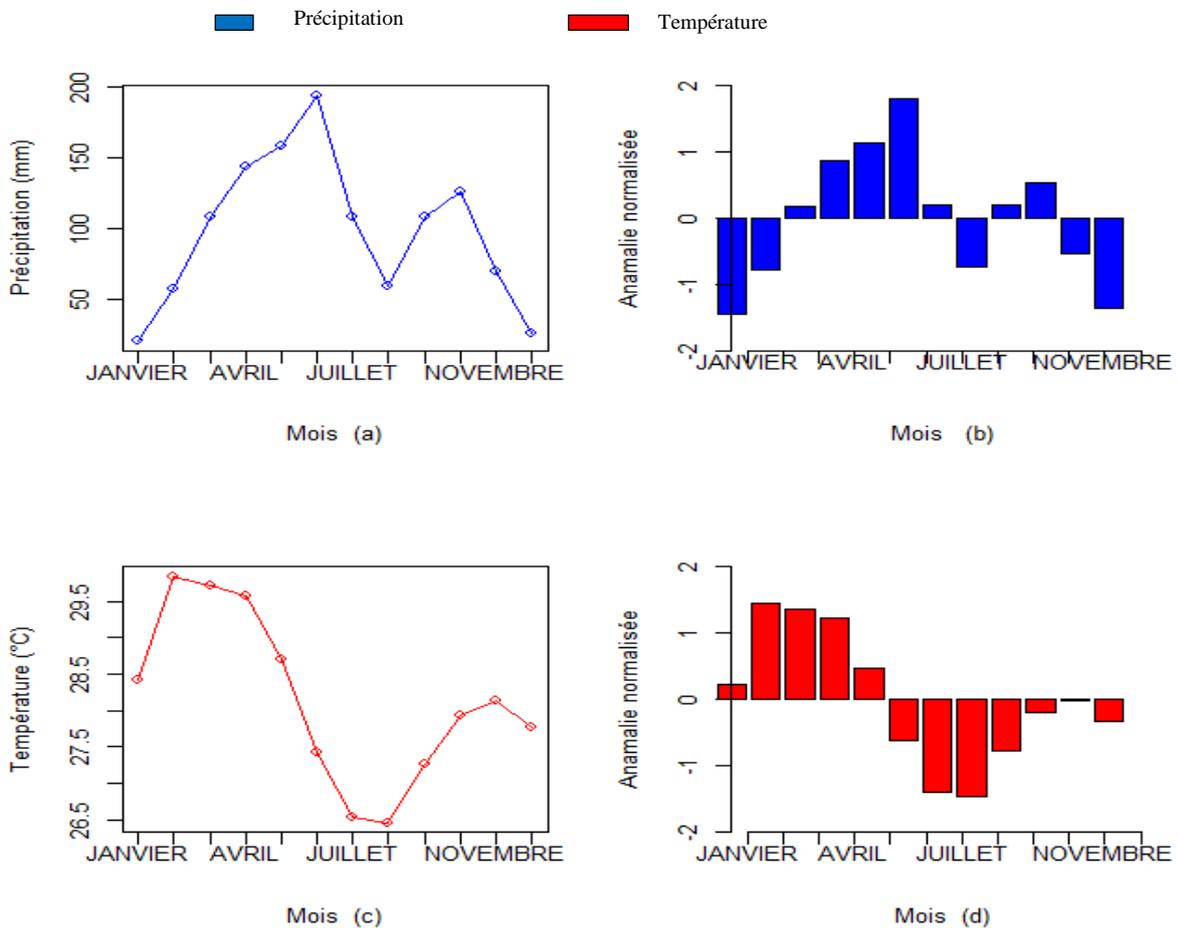


Figure 4 : Cycles annuels moyens des précipitations et des températures mensuelles et leurs anomalies normalisées

3.1.1.1 Variations de la pluviométrie

Les hauteurs des pluies moyennes mensuelles enregistrées dans la zone de Lamto au cours de la période 1964-2019 varient entre un minimum de 20,49 mm en Janvier et un maximum de 193,98 mm en Juin, avec une pluie moyenne mensuelle de 98,12 mm (Figure 4.a).

L'analyse de la variabilité temporelle de l'anomalie normalisée associée au cours des différents mois, de Janvier à Décembre, a permis de situer la zone de Lamto dans son contexte temporel (Figure 4.b).

Cependant, les résultats obtenus montrent une répartition hétérogène des intensités pluviométriques sur tous les mois. La période de Mars à Juillet et la période de Septembre à Octobre correspondent aux périodes pluviométriques excédentaires caractéristiques respectivement de la grande saison des pluies et la petite saison pluvieuse. Tandis que la période de Juillet à Septembre et la période de Novembre à février apparaissent comme des périodes pluviométriques déficitaires associées respectivement à la petite saison sèche et à la grande saison sèche. Si l'on considère chaque mois, la courbe de l'anomalie indique trois mois pluvieux (Avril, Mai et Juin), quatre mois plus humide (Mars, Juillet, Septembre et Octobre) et cinq mois secs (Novembre, Décembre, Janvier, Février et Aout). La zone de Lamto est soumise à un climat subhumide sous l'influence de la mousson africaine qui définit quatre (4) saisons dans le cycle annuel selon les variations de l'anomalie normalisée. Nos résultats sont en accord avec ceux des travaux précédents de Diawara *et al.* (2014) dans une étude de caractérisation du climat de la zone de Lamto.

3.1.1.2 Variations de la température de l'air

Les valeurs moyennes mensuelles de la température de l'air et de ses anomalies normalisées associées sur la période 1964-2019, sont représentées respectivement par les figures 4.c et 4.d.

Les températures moyennes mensuelles varient entre un minimum de 26,47°C (Août) et un maximum de 29,84 (Février) avec une moyenne de 28,15°C. Les variations annuelles des températures de l'air montrent que celles-ci sont supérieures à la moyenne de l'ensemble sur la période de Janvier à Mai, mais varient peu d'un mois à l'autre et elles restent inférieures à la moyenne de l'ensemble sur la période de Juin à Décembre, mais varient peu d'un mois à l'autre au cours de l'année. On observe en général, de faibles valeurs de température pendant les mois de fortes pluviométries et de fortes valeurs pendant les mois de faibles pluviométries dues probablement au fait que en saison pluvieuse, le ciel est densément nuageux avec présence de

fortes valeurs d'humidité relative et donc il y a diminution du flux radiatif atteignant le sol car une partie contribue à l'évaporation.

3.1.1.3 Détermination des mois secs

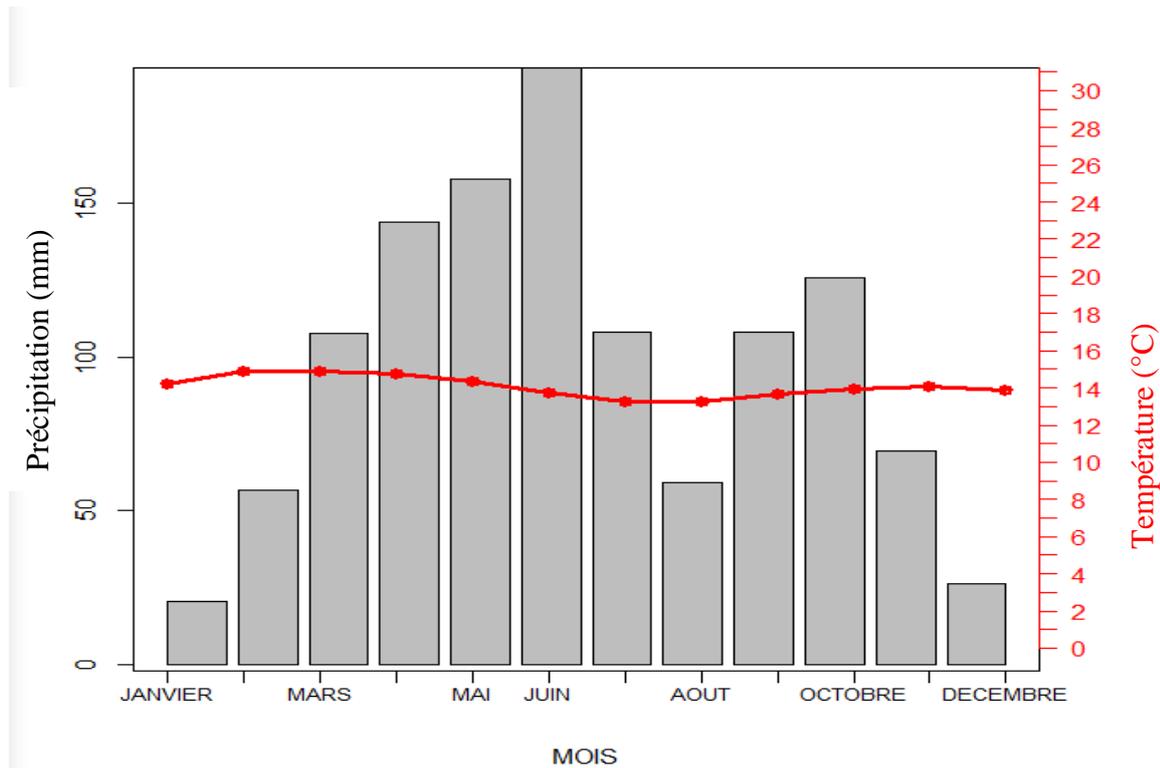


Figure 5 : Diagramme ombrothermique moyen sur la période 1964-2019 à Lamto

Les diagrammes reliant température et précipitation ou diagrammes ombrothermiques présentent certaines valeurs de précipitations au-dessus et d'autre en dessous de la courbe de température. Cependant, celles situées en dessous représentent des mois déficitaires (secs) en précipitations. De ce fait, la zone de Lamto est caractérisée par 5 mois (Janvier, Février, Août, Novembre et Décembre) déficitaires en précipitations et 7 autres mois (Mars, Avril, Mai, Juin, Juillet, Septembre et Octobre) humides. A l'échelle mensuelle, les totaux pluviométriques les plus importants sont notés durant la saison des pluies, période durant laquelle, les températures sont relativement en baisse, du fait de la présence de l'humidité dans l'air qui accompagne les flux de mousson.

3.1.2 Variabilité interannuelle

3.1.2.1 Variations pluviométriques

La Figure 6 montre les variations interannuelles des précipitations et leurs tendances associées. Par ailleurs, les anomalies standardisées présentées également à la Figure 7, lorsqu'elles sont associées à la courbe de tendance d'évolution (Figure 6) reflètent un bon accord avec les fluctuations des précipitations caractérisées par une alternance d'années humides, normales et sèches à Lamto.

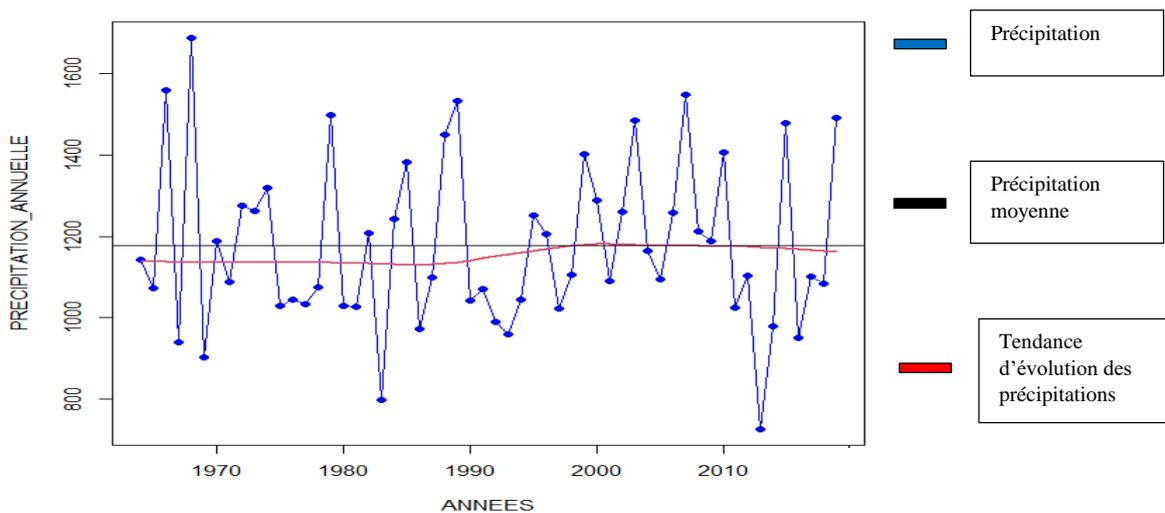


Figure 6 : Évolutions interannuelles de la pluviométrie sur la période 1964-2019 dans la région de Lamto

On attend par période normale, une période où les indices se répartissent de façon équilibrée de part et d'autre du zéro de l'axe des abscisses. Ainsi, l'analyse conjointe des Figures 6 et 7 met en évidence des périodes humides (1964-1968, 1984-1989 et 2006-2010) durant lesquelles la quantité des pluies a été exceptionnellement élevée. La valeur maximale a été observée en 1968 (1688 mm) qui est loin de la normale. Cela peut être expliqué par les phénomènes de fortes pluviométrie qui se sont manifestés à l'époque et ont engendré des situations d'inondations au niveau de l'Afrique de l'Ouest (Kouadio *et al.*, 2011).

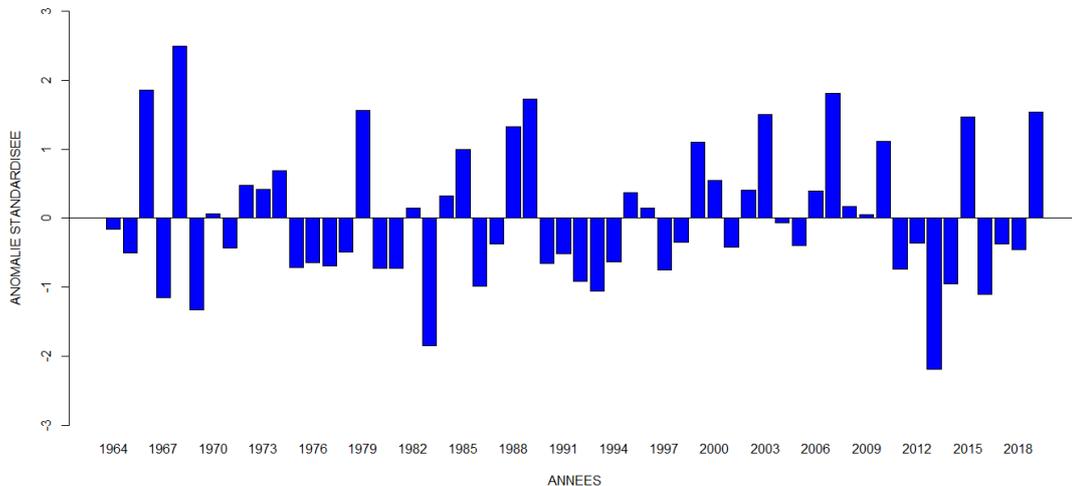


Figure 7 : Évolution interannuelle des anomalies normalisées sur la période 1964-2019 à Lamto

Les fluctuations de part et d’autre des anomalies standardisées de la période 1997-2012 mettent en évidence une période normale. Celle-ci est également mise en évidence par la courbe de tendance ou d’évolution de la figure 6. Les fluctuations des anomalies normalisées illustrent que les périodes 1970-1983, 1990-1998 et 2013-2018 ont enregistré un déficit important de précipitations. Les années 1983 (796,9 mm) et 2013 (726 mm) ont été les plus déficitaires en précipitation durant toute la série temporelle. Les événements de sécheresse apparus lors des dernières périodes précédentes peuvent être liés aux déficits pluviométriques observés en Afrique de l’Ouest (Barbé *et al.*, 2002).

3.1.2.2 Analyse et détermination des ruptures de tendance

Une analyse complémentaire des tendances à court et à long termes des variations interannuelles des précipitations et des températures est maintenant fournie en utilisant un diagnostic statistique basé sur la régression linéaire par ajustement des moindres carrés (Liebmann *et al.*, 2010). Cette méthode est fréquemment utilisée pour détecter objectivement une ou plusieurs ruptures de tendance dans les séries chronologiques des précipitations et températures lorsqu’elles se produisent. La Figure 8 montre toutes les tendances pour les fenêtres temporelles de 2 à 56 ans (longueur totale de la série chronologique), avec un niveau de confiance de 95% suivant le test de student. Les variations de la précipitation (Figure 8-a) et de la température (Figure 8-b) sont obtenues en multipliant le coefficient des tendances linéaires par la longueur des séries temporelles. Il est évident que les fenêtres temporelles de quelques années peuvent présenter soit un excès de précipitations soit un déficit de

précipitations, alors que les tendances pour les fenêtres temporelles plus longues sont assez faibles par rapport à celles présentes dans les fenêtres temporelles plus courtes. Ainsi, une alternance de tendances négatives et positives se produit si toutes les longueurs des fenêtres temporelles en ordonnée sont prises en compte. Cela signifie qu'il n'y a pas de rupture de tendances à long terme pour les précipitations. Cependant, une tendance positive significative se produit après 1995 et reste permanente jusqu'en 2010 avec une fenêtre temporelle de 5 ans. Cela correspond à l'augmentation des précipitations constatée entre les décennies 1995-2001 (voir Figure 6). Aussi, une tendance négative significative se produit sur les périodes 1975-1978, 1990-1994 et 2012-2015. Cela correspond à la baisse des précipitations constatée entre les périodes 1970-1983, 1990-1998 et 2013-2015 (voir Figure 7). Dans le cas de la température (voir Figure 8-b), une rupture de tendance à long terme se produit pour une fenêtre temporelle supérieure à 30 ans.

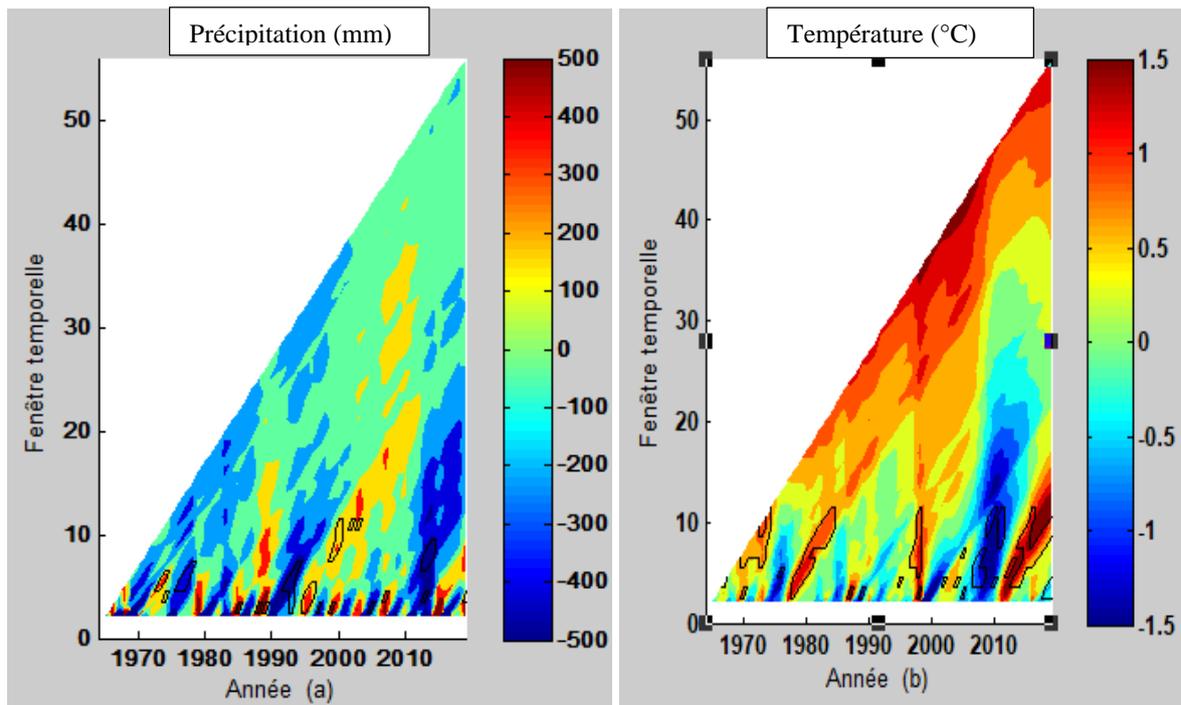


Figure 8 : Évolutions des moyennes interannuelles des précipitations et des températures mesurées à Lamto sur la période 1964-2019.

Par ailleurs, une tendance négative existe de 1962 à 2008, alors qu'après 2008, aucune tendance négative et significative n'est observée. Cependant, pour une fenêtre temporelle supérieure à 10 ans, une tendance négative et significative de la température (-1°C) se produit de 2005 à 2011. Cette tendance correspond bien à l'augmentation des précipitations pendant cette période.

3.2 Variations temporelles des indices SPI

Le SPI est une méthode proposée pour mesurer la gravité de la sécheresse pour une station pluviale particulière. Lors de l'interprétation du SPI, il est essentiel d'avoir une compréhension de l'intervalle de temps utilisé pour interpréter les valeurs. Dans notre étude on utilisera le SPI sur 1, 3 et 12 mois, c'est-à-dire, les SPI basés respectivement sur la sécheresse météorologique, agricole et hydrologique. Nous avons comme données, les précipitations mensuelles de 1964 à 2019 de la zone de Lamto. Ainsi, nous allons calculer le SPI respectif de chaque mois durant ces 56 années. Notre étude va se focaliser précisément sur les périodes de sècheresses apparues dans la série d'étude.

3.2.1 Évaluation de la variabilité temporelle de l'indice SPI sur 1 mois

La figure 9 montre les variations de l'indice normalisé de précipitation sur 1 mois de la zone de Lamto sur la période 1964-2019. L'indice SPI calculé sur 1 mois représente le pourcentage de la normale des précipitations pour une période de 30 jours. L'indice dérivé offre en fait une représentation plus exacte des précipitations mensuelles, car la distribution est normalisée. A titre d'exemple, l'indice SPI sur 1 mois se terminant fin Décembre établit la comparaison entre le total mensuel des précipitations en Décembre de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés.

Comme le montre la figure 9, des indices positifs et négatifs existent au niveau de chaque intervalle de temps. Cependant des événements de sécheresse et d'humidité ont été détectés pour chaque pas de temps. Ainsi, le SPI sur 1 mois indique des conditions à court terme qui peuvent être étroitement associées à la sécheresse météorologique. Par ailleurs, par rapport aux fluctuations des valeurs du SPI, on peut distinguer trois périodes climatiques qui sont réparties comme suit : période déficitaire (sèche), période humide et période normale. Selon la classification adoptée par l'Organisation Mondiale de la Météorologie, la période normale est la période où la valeur du SPI est comprise entre -0,99 et 0,99 ($-0,99 < \text{SPI} < 0,99$).

- Période déficitaire

Cette période de sécheresse comprend plusieurs classes de sécheresse.

- Classe Extrêmement Sèche (SE) : $\text{SPI} < -2$

La sécheresse extrême est marquée par quelques épisodes de sécheresses observées sur la période d'étude.

En 1964, la sécheresse débute en octobre et prend fin en novembre avec une durée d'un mois et atteint un pic de SPI de -2,32. Trois ans plus tard, elle apparaît en 1967 avec la même durée et un pic de -2,08. Les années les plus touchées par la sécheresse extrême (SE) sont localisées dans la période 1976-1995, avec une durée de deux mois en 1976, 1982 et 1990 et une durée de 3 mois en 1983. Cette période est caractérisée par un pic minimal de -2,03 (février 1990 et août 1992) et un pic maximal de -4,13 (septembre 1982). Cette classe de sécheresse fait une dernière apparition sur la série temporelle d'étude, 18 ans plus tard en 2013, et dure pratiquement 3 mois avec un pic d'environ -4,09 (avril 2013).

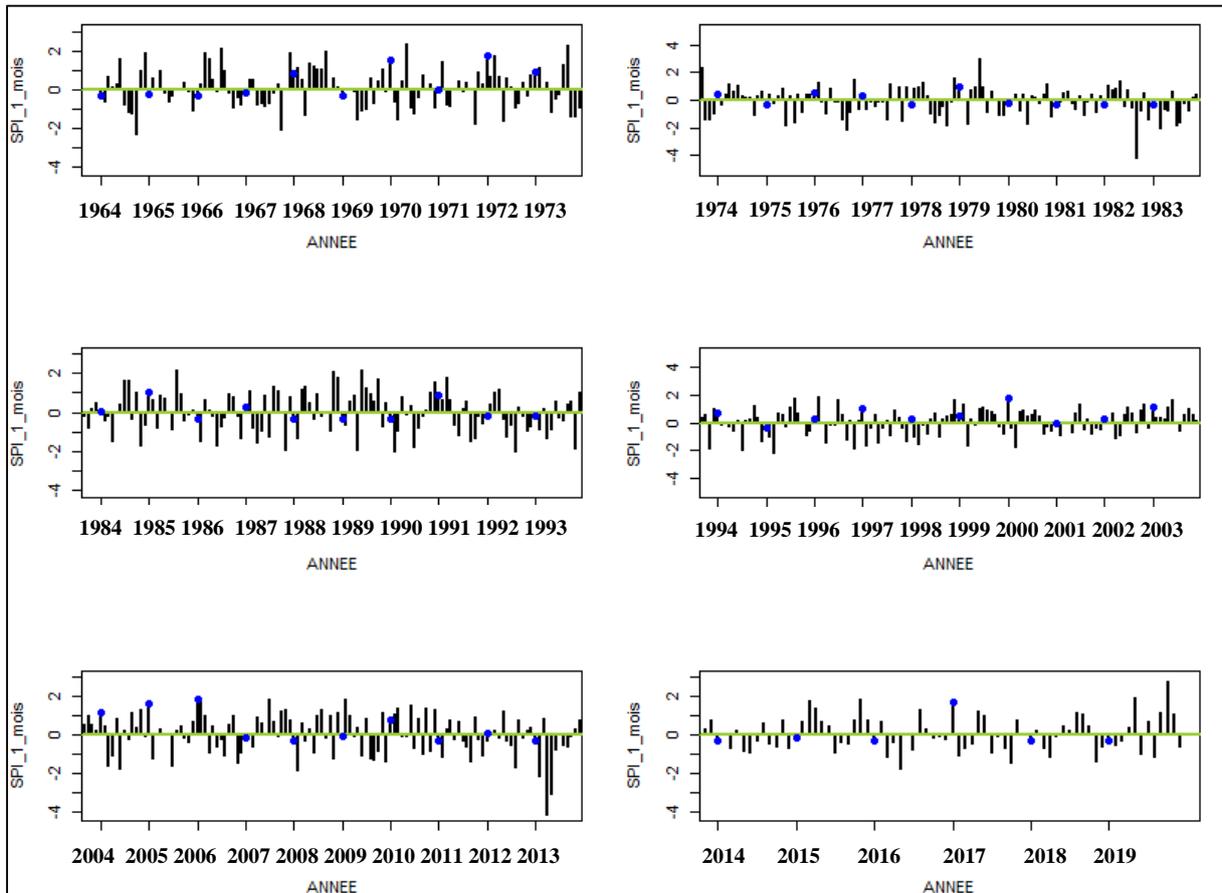


Figure 9 : Évolutions mensuelles de l'indice SPI sur 1 mois dans la région de Lamto sur la période 1964-2019

- Classe Sévèrement Sèche (SS) : $-1,99 < SPI < -1,5$

Les événements de sécheresse sévère débutent en 1969 (au mois de mai), pour une durée enregistrée de 3 mois avec un pic de -1,53. Ces événements continuent d'apparaître les années suivantes au moins une fois par an jusqu'en 2012. Par ailleurs, les années 1978, 1983, 1990 et 1998 ont pratiquement connus de longue durée (3 mois au moins) de sécheresse sévère avec des pics respectifs de -1,85 ; -1,85; -1,83 et -1,51.

- Classe modérément sèche (SM) : $-1,49 < \text{SPI} < -1$

Les événements de sécheresse modérée sont détectés sur toute la série temporelle d'étude. Ils apparaissent au moins une fois chaque année et leur durée varie de un à cinq mois. Les plus longues périodes de sécheresse modérée ont été dans les années 1979 ; 1991 et 2018 dont les durées respectives sont 4 ; 5 et 5 mois avec un pic de -1,1 ; -1,49 et -1,39 chacune.

- Période normale $-0,99 < \text{SPI} < 0,99$

Des valeurs de SPI caractérisant des conditions de sécheresse légère et d'humidité légère sont fréquemment trouvées sur toute la période d'observation.

- Période humide : $\text{SPI} > 1$

Les périodes humides sont observées et caractérisées par une succession de valeurs de SPI positives et supérieures à 1.

3.2.2 Évaluation de la variabilité temporelle de l'indice SPI sur 3 mois

L'indice SPI sur 3 mois établit la comparaison entre le total des précipitations sur la période de trois mois examiné et les totaux des précipitations pour cette même période de trois mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. En d'autres termes, l'indice SPI sur 3 mois se terminant fin février, permet de comparer le cumul des précipitations des mois de décembre, janvier et février de l'année examinée aux cumuls de précipitations de décembre à février de toutes les années figurant dans l'historique des observations exécutées à la station concernée. La figure 10 indique la période, la durée, le pic et le type de sécheresse rencontrée. On définit aussi les critères d'un épisode de sécheresse pour une échelle de temps. Par conséquent, pour chaque épisode de sécheresse, on distingue une durée, avec un commencement et une fin, et une intensité pour chaque mois durant lequel l'épisode se poursuit.

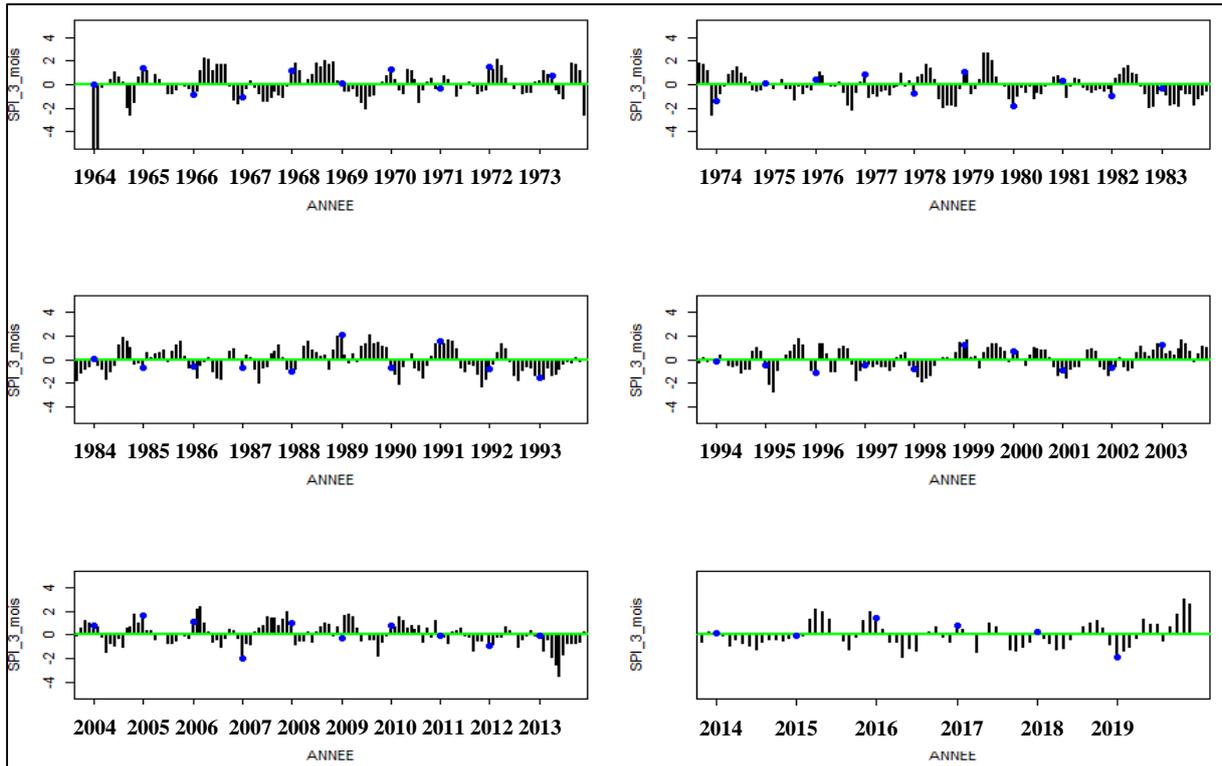


Figure 10 : Evolutions mensuelles de l'indice SPI sur 3 mois sur la période 1964-2019.

Par rapport aux fluctuations des valeurs de SPI de 3 mois sur la période d'étude, cette région est caractérisée par trois périodes climatiques.

- Période déficitaire

Cette période de sécheresse est marquée par des épisodes de sécheresse extrême, sévère et modérée. Les fluctuations du SPI présentent des années de sécheresses extrêmes, en 1964, 1969, 1974, 1976, 1987, 1990, 1992, 1995, 2007 et 2013 caractérisées par des pics respectifs de -2,56 ; -2,08 ; -2,59 ; -2,19 ; -2,01 ; -2,08 ; -2,31 ; -2,7 ; -2,03 et -3,5. Par ailleurs, les évènements de sécheresse sévère débutent en 1966 avec un pic de -1,59 et la durée enregistrée est de 4 mois et se prolongent sur la période 1978-1986 avec un pic minimal de -1,96 en 1983 et un pic maximal de -1,54 en 1986. Cependant, les périodes 1971-1973, 2001-2004, 2011-2012, 2014-2015 et 2017-2018 ont connu des évènements de sécheresse modérée dont les valeurs des pics sont comprises entre -1,47 et -1.

- Période normale

Cette période prend en compte toutes les valeurs du SPI comprises entre -0,99 et -0,99. Elle apparaît presque sur toute la série chronologique.

- Période humide

Les périodes humides sont observées et caractérisées par une succession de valeurs de SPI positives supérieures à 1.

3.2.3 Évaluation de la variabilité temporelle de l'indice SPI sur 12 mois

À l'échelle de temps de 12 mois, l'indice SPI fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance. L'indice SPI sur 12 mois établit alors la comparaison entre les précipitations sur une période de 12 mois consécutifs et celles enregistrées sur la même série de 12 mois consécutifs de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. Étant donné que ces échelles de temps constituent le cumul de périodes plus courtes pouvant se situer au-dessus ou au-dessous de la normale, les valeurs des indices SPI établis pour une période relativement longue tendent à graviter autour de zéro, à moins qu'une tendance humide ou sèche bien distincte ne se soit installée. Les indices SPI pour cette échelle de temps sont en général associés au débit des cours d'eau, au niveau des réservoirs et au niveau des eaux souterraines à relativement long terme. L'indice de sécheresse SPI-12 a permis de voir les principales années de sécheresse sur le bassin de Lamto.

Par rapport aux fluctuations des valeurs de SPI de 12 mois sur la période d'étude, cette région est caractérisée par trois périodes climatiques.

- Période déficitaire

Cette période de sécheresse est marquée par des épisodes de sécheresses extrêmes, sévères et modérées. Les fluctuations du SPI présentent trois années de sécheresses extrêmes, en 1983, 1992 et 2013 caractérisées par des pics respectifs de -2,58 ; -2,61 ; et -2,75. Par ailleurs, les événements de sécheresse sévère débutent en 1967 et la durée enregistrée est de 11 mois avec un pic de -1,84 et se prolongent sur la période 1969-1984 avec un pic maximal de -1,55 en 1969 et un pic minimal de -1,75 en 1978. Cependant, les périodes 1979-1982, 1986-1991 et l'année 2016 ont connu des événements de sécheresse modérée.

- Période normale

Les fluctuations des valeurs de SPI caractérisant des conditions de sécheresse légère et d'humidité légère sont observées de manière générale sur la période d'étude. Ces événements

sont prédominants sur la période 2000-2011, qui est liée à la normale des précipitations sur cette période.

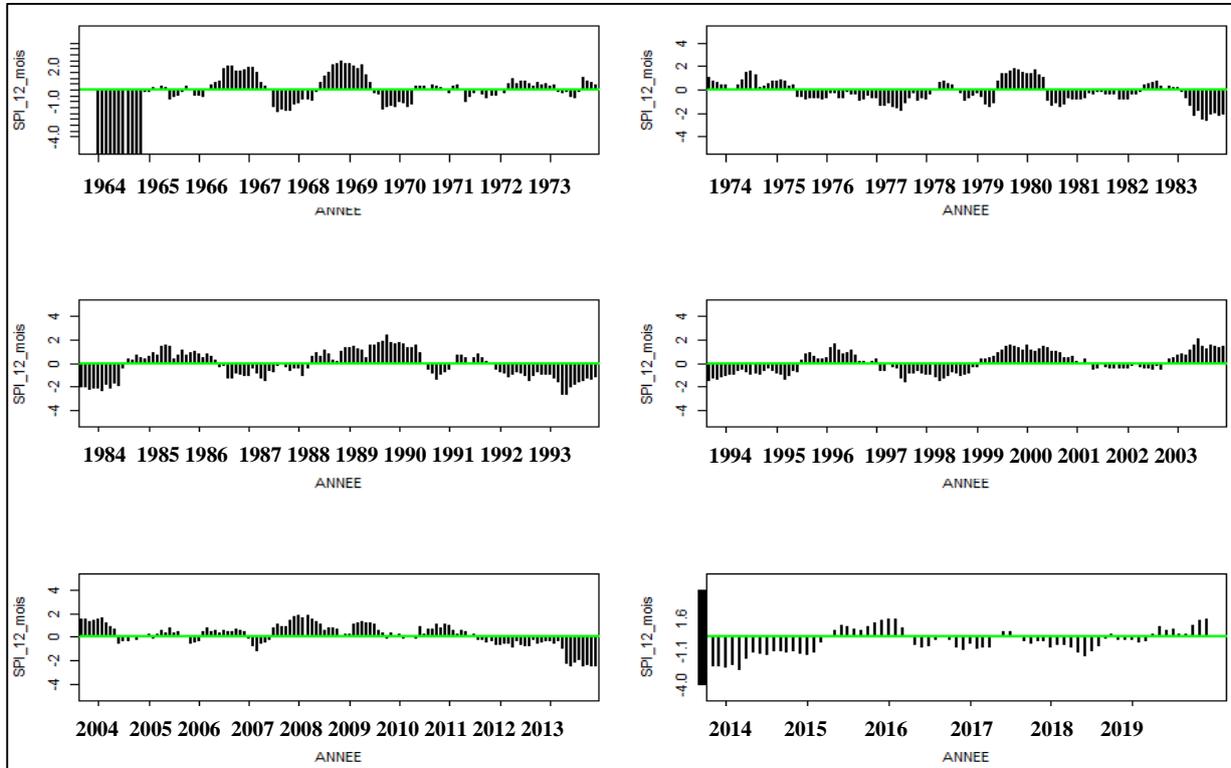


Figure 11 : Évolution de l'indice SPI de 12 mois dans la région de Lamto sur la période 1964-2019

- Période humide

Les périodes humides sont observées et caractérisées par une succession de valeurs de SPI positives supérieures à 1.

3.3 Tendence climatologique à partir de l'indice SPI

3.3.1 Évaluation de la tendance climatologique du SPI sur 1 mois

A partir de l'analyse de la figure 9 et les informations fournies dans le tableau II, nous avons déterminé les fréquences et les probabilités d'occurrence des mois secs et humides sur la série chronologique des indices SPI calculés et les résultats sont résumés dans le tableau III ci-dessous.

Tableau III : Nombre d'apparition des périodes humide et sèche avec leur probabilité d'occurrence de SPI sur 1 mois.

Intervalle SPI	Fréquence (nombre de mois d'apparition sur la période)		Probabilité d'occurrence		Séquence de sécheresse
$SPI > 2$	9		1.34		Humidité extrême
$1.99 > SPI > 1.5$	33		4.92		Humidité sévère
$1.49 > SPI > 1$	77		11.45		Humidité modérée
$0.99 > SPI > 0$	237	446	35.26	66.36	Proche de la normale
$0 > SPI > -0.99$	209		31.10		
$-1 > SPI > -1.49$	60		8.93		Sécheresse modérée
$-1.5 > SPI > -1.99$	34		5.06		Sécheresse Sévère
$-2 > SPI$	13		1.94		Sécheresse extrême

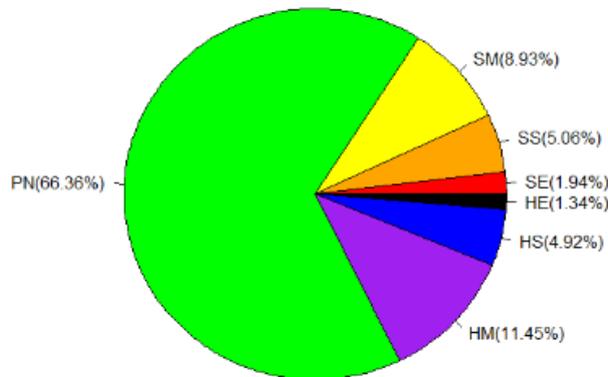


Figure 12 : Fréquences des classes de sécheresse et d'humidité à partir de SPI sur 1 mois

On note alors que la zone de Lamto a connu des périodes de sécheresses météorologiques et des périodes humidité. En effet, les périodes de sécheresses météorologiques sont composées de plusieurs classes (extrême, sévère et modérée) selon les valeurs du SPI. Les classes extrêmement sèche, sévèrement sèche et modérément sèche, ont une faible probabilité d'apparition et les fréquences sur la série chronologique sont respectivement de 1,94%, 5,06% et 8,93%. Les conditions climatiques supposées normales s'étendent de la sécheresse légère ($0 > SPI > -0.99$) à l'humidité légère ($0 < SPI < 0.99$) et dans ces conditions, les effets semblent peu perceptibles en termes de stress, si l'on considère que ce sont les états extrêmes qui ont plus

d'impacts. Ainsi, la zone de Lamto se trouve en générale dans les conditions moyennes climatiques supposées normales avec une probabilité d'occurrence de 66,36% en terme de sécheresse météorologique.

3.3.2 Evaluation de la tendance climatologique du SPI sur 3 mois

On note ici, que la zone de Lamto a connu des périodes de sécheresses agricoles et des périodes humides selon les valeurs du SPI calculées et fournies dans le Tableau IV. Les périodes de sécheresses agricoles sont composées de plusieurs classes (extrême, sévère et modérée). Les classes extrêmement sèche, sévèrement sèche et modérément sèche, ont une faible probabilité d'apparition sur toute la série chronologique. Les fréquences d'apparition de ces sécheresses sont respectivement de 2,23% ; 5,21% et 8,33%. Par ailleurs, l'évaluation et le suivi de la sécheresse agricole sont essentiels pour l'aide à la prise de décisions en matière de gestion et de planification de l'agriculture et des ressources en eau. La zone de Lamto est une zone agricole et les conditions supposées normales qui s'étendent de la sécheresse légère ($0 > \text{SPI} > -0.99$) à l'humidité légère ($0 < \text{SPI} < 0.99$) ont une grande probabilité d'occurrence avec une fréquence de 60,92% (Figure 13 et tableau IV associé). Elle offre de ce fait un cadre idéal pour les activités culturelles et le développement de la végétation.

Tableau IV : Nombre d'apparition des périodes humide et sèche avec leur probabilité d'occurrence de SPI sur 3 mois à Lamto.

Intervalle SPI	Fréquence (nombre de mois d'apparition sur la période)		Probabilité d'occurrence		Séquence de sécheresse
$\text{SPI} > 2$	18		2.69		Humidité extrême
$1.99 > \text{SPI} > 1.5$	33		4.91		Humidité sévère
$1.49 > \text{SPI} > 1$	72		10.71		Humidité modérée
$0.99 > \text{SPI} > 0$	202	443	30.06	60.92	Proche de la normale
$0 > \text{SPI} > -0.99$	241		30.86		
$-1 > \text{SPI} > -1.49$	56		8.33		Sécheresse modérée
$-1.5 > \text{SPI} > -1.99$	35		5.21		Sécheresse Sévère
$-2 > \text{SPI}$	15		2.23		Sécheresse extrême

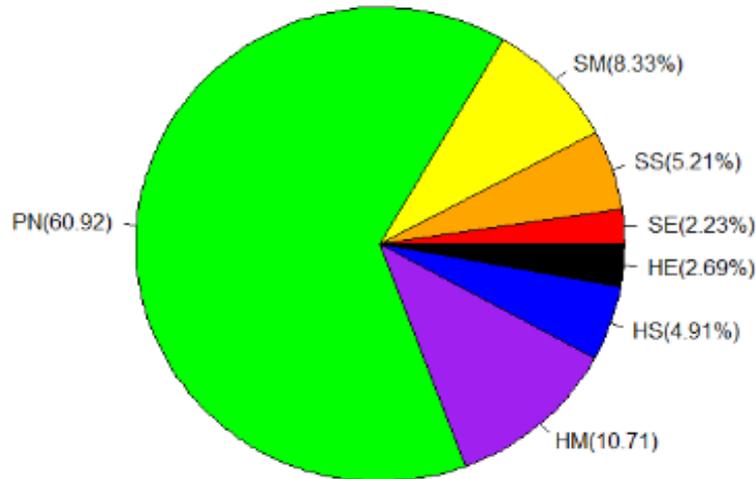


Figure 13 : Fréquences des classes de sécheresse et d'humidité à partir de SPI sur 3 mois.

3.3.3 Evaluation de la tendance climatologique du SPI sur 12 mois

Les résultats des indices SPI calculés et fournis dans le Tableau V montrent que la zone de Lamto enregistre des épisodes de sécheresses hydrologiques et de périodes humides composées de plusieurs séquences au cours de la période 1964-2019. Ces périodes de sécheresses hydrologiques sont étroitement liées à des déficits à long terme des précipitations et peuvent entraîner une diminution des débits d'écoulement des rivières, fleuves et les ressources en eaux souterraines de la région. En effet, Bodian *et al.* (2011) et Mahé *et al.* (1991), ont montré qu'en Afrique soudano-guinéenne, la diminution des rivières est proportionnelle à celle des précipitations auxquelles s'ajoute une lente diminution et durable des ressources en eaux souterraines. Cela conduit conséquemment à une augmentation des vitesses de tarissement du niveau moyen des nappes. Bien que la zone de Lamto connaisse des sécheresses hydrologiques de classes extrêmes, sévères et modérées dont les fréquences d'apparition sont inférieures à 10% (tableau V), on note que dans la majeure partie des cas, cette région se trouve dans des conditions hydrologiques supposées normales. Cette classe prédominante, d'après l'analyse de la Figure 14 a une probabilité d'occurrence de 65,47% sur l'ensemble de la série chronologique de 1964-2019. La période sèche qui équivaut à l'ensemble des épisodes de sécheresse toute tendance confondue à une fréquence cumulée de 17,42% suivi de la période humide avec un pourcentage de 17.22% du total des enregistrements.

Tableau V : Nombre d'apparition des périodes humide et sèche avec leur probabilité d'occurrence de SPI sur 12 mois.

Intervalle SPI	Fréquence (nombre de mois d'apparition sur la période)		Probabilité d'occurrence		Séquence de sécheresse
$SPI > 2$	11		1.64		Humidité extrême
$1.99 > SPI > 1.5$	50		7.4		Humidité sévère
$1.49 > SPI > 1$	55		8.18		Humidité modérée
$0.99 > SPI > 0$	217	440	32.29	65.47	Proche de la normale
$0 > SPI > -0.99$	223		33.18		
$-1 > SPI > -1.49$	63		9.38		Sécheresse modérée
$-1.5 > SPI > -1.99$	19		2.83		Sécheresse Sévère
$-2 > SPI$	34		5.1		Sécheresse extrême

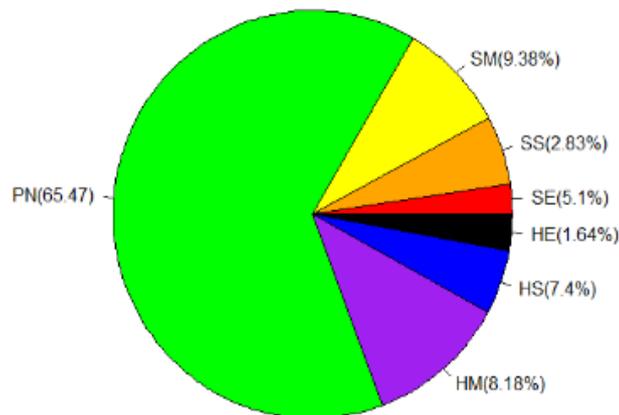


Figure 14 : Fréquences des classes de sécheresse et d'humidité à partir de SPI sur 12 mois

DISCUSSIONS

La zone de Lamto a connu une variabilité climatique, matérialisée par une alternance d'années humides et sèches par l'évolution des anomalies normalisées et des indices SPI. Le caractère déficitaire des précipitations observé au cours de cette étude s'est généralement produit après 1970. La baisse des précipitations a également été signalée par plusieurs auteurs en Côte d'Ivoire (Amani, 2003 ; Kouadio, 2004 ; Yao, 2005). Les travaux de Amani (2003) fixent cette régression à partir de 1967 dans les régions du grand ouest du pays. Ceux de Kouadio (2004) indiquent une baisse des pluviométries dans le bassin du N'Zi autour des années 1968 tandis que Yao (2005), à travers l'étude menée dans le Sud du pays, a montré une baisse considérable de la pluviométrie au cours de la décennie (1989-1999) qui a eu des répercussions sur le bilan hydrique. Afin d'analyser l'impact des différentes fluctuations pluviométriques sur les conditions météorologiques, agricoles et hydrologique, l'indice SPI a été calculé à différentes échelles de temps, respectivement 1 mois, 3 mois et 12 mois. L'analyse des valeurs du SPI a révélé que la zone de Lamto a été touchée par des épisodes de sécheresses météorologiques, agricoles et hydrologiques avec des pics de sécheresse observés. Ces pics sont caractérisés par des types de sécheresses modérées à extrêmes. Ces épisodes de sécheresse correspondent généralement aux déficits de précipitation observés. Les évènements de sécheresse détectés correspondent aux cas où la valeur de SPI dépasse un seuil donné. Les valeurs des SPI à différentes échelles de temps montrent que les sécheresses dans la zone de Lamto étaient généralement d'intensité modérée. Des résultats similaires ont également été obtenus par L'Hôte *et al.* (2002) tout comme Ali & Lebel (2009) qui ont montré la persistance de la sécheresse durant les années 1970 dans toute l'Afrique de l'Ouest, notamment le Sahel. D'autre part, à partir de l'anomalie normalisée, la période 1995-2010 signale une reprise de la pluviométrie ce qui engendre des périodes humides à partir du SPI dans la zone de Lamto . L'augmentation des précipitations durant la période 1995-2010 pourrait être liée au développement de la végétation, qui est sous protection écologique depuis de nombreuses années. Cette reprise a été observée par Amani (2003) à partir de 1993 dans certaines régions de l'Ouest de la Côte d'Ivoire (Man, Guiglo). Goula *et al.* (2006) à travers leur étude ont aussi souligné une reprise de la pluviométrie normale sur le bassin versant du N'zo à Kahin de 1994 à 2000. Cette amélioration pluviométrique qui contraste avec les années précédentes de sécheresse, est également constatée ailleurs en Afrique par Bodian *et al.*, (2011). L'influence de l'échelle de temps sur le nombre et la durée des sécheresses détectées est clairement apparente. Il a été observé que sur des échelles plus petites telles que les SPI sur 1 mois et SPI

sur 3 mois, les intensités de sécheresse sont très variables. Cependant, sur des délais plus long tels que le SPI sur 12 mois, l'intensité de la sécheresse diminue. Plusieurs auteurs (Faye, 2013 ; Faye *et al.*, 2015) ont notamment utilisé l'indice SPI en Afrique de l'Ouest et avaient conclu à un déficit pluviométrique depuis les années 1970.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail consistait à caractériser les périodes de sécheresses dans la zone de Lamto (Côte d'Ivoire) à partir d'un indice de précipitation standardisée (SPI). Ainsi, les séries chronologiques des SPI ont révélé que la zone de Lamto a connu des épisodes ou séquences de sécheresse météorologiques, agricoles et hydrologiques, qui ont varié en intensité d'extrême à modérée avec des fréquences d'apparition inférieures à 10%. Par ailleurs, les événements de sécheresse détectés correspondent aux cas où les valeurs de SPI sont négatives. Ces valeurs de SPI à différentes échelles de temps ont montré que les sécheresses dans la zone de Lamto étaient généralement d'intensités légères ou modérées.

D'un point de vue méthodologique, ce travail vient confirmer la pertinence de la méthode, c'est-à-dire de distinguer les périodes de sécheresse caractérisées à court, à moyen et à long termes. Par conséquent, l'indice SPI prend en compte la sécheresse à court terme (1 mois), la sécheresse à moyen terme (3 mois) et la sécheresse à long terme (12 mois). Les sécheresses à court et moyen termes affecteront l'approvisionnement en eau, les conditions environnementales et modifieront le cycle végétatif des plantes et les activités biosphériques. Il s'agit principalement des sécheresses météorologiques et agricoles. D'autre part, une sécheresse à long terme affectera également les ressources en eau de surface et souterraines, pour induire une sécheresse hydrologique.

La zone de Lamto dans l'ensemble présente dans la majeure partie des cas (météorologie, agricole et hydrologie) des conditions normales qui conduisent à un climat normal avec une probabilité d'occurrence comprise entre 60,92% et 66,36%. L'indice SPI, étant un indicateur de sécheresse, les résultats obtenus dans ce travail pourraient permettre l'évaluation et le suivi de la sécheresse agricole et constituer par conséquent, un outil d'aide à la prise de décisions en matière de gestion et de planification des programmes d'urgence agricoles (Riz, etc.) et des ressources en eau.

Le travail réalisé ici pourrait être étendu à d'autres régions de la Côte d'Ivoire et amélioré à partir d'autres indices (comme l'indice SPEI) qui utilisent les paramètres de température et de précipitation pour prévenir l'occurrence des sécheresses afin d'améliorer les systèmes d'alertes précoces et soutenir les services climatiques nationaux.

REFERENCES

- Aiguo D., Kevin E.T. & Taotao Q. (2004). A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002 : Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming. *Journal Hydrometeor*, 5(6) : 1117-1130.
- Ali A. & Lebel T. (2009). The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, 29 (12) : 1705-1714.
- Amani K.M. (2003). Apports des méthodes statistiques et géostatistiques à l'étude de la variabilité hydroclimatique dans la région semi-montagneuse de Côte d'Ivoire. Cas du bassin versant du N'Zo. Mémoire de DEA des Sciences de la Terre, Université de Cocody, 65 p.
- Bernus E. & Savonnet G. (1973). Les problèmes de la sécheresse dans l'Afrique de l'Ouest. *Présence africaine*, 88(4) : 113-138.
- Bielli S., Douville H. & Pohl B. (2009). Understanding the West African monsoon variability and its remote effects: an illustration of the grid point nudging methodology. *Climate Dynamics*, 35(1) : 159-174.
- Bodian A., Dacosta H. & Dezetter A. (2011). Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. *Physio-Géo*, 5 : 107-124.
- CCNUCC (1992). La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changement Climatiques Juin 1992 avait été arrêtée le 9 Mai 1992 à New York, 25 p.
- Diawara A., Yoroba F., Kouadio K.Y., Kouassi K.B., Assamoi E.M., Diedhiou, A. & Assamoi P. (2014). Climate Variability in the Sudano-Guinean Transition Area and Its Impact on Vegetation : The Case of the Lamto Region in Côte D'Ivoire. *Advances in Meteorology*, 11 p.
- Diedhiou A., Janicot S., Viltard A., P. Felice & Laurent H. (1992). Easterly waves regimes and associated convection over west Africa and the tropical Atlantic: Results from NCEP-NCAR and ECMWF reanalyses. *Climate Dynamics*, 15(11) : 795-822.
- FAO (1996). La situation mondiale de l'alimentation et l'agriculture. FOA : agriculture, Rome (Italie), 352 p.
- Faye C. (2013). Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé. Thèse (PhD). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 309 p.

- Faye C. (2015). Caractérisation des basses eaux : les effets durables du déficit pluviométrique sur les étiages et le tarissement dans le bassin du Bakoye. *Espaces et Sociétés en Mutation* (Numéro Spéciale), 109-126.
- Fontaine B. & Janicot S. (1992). Wind-field coherence and its variations over West Africa. *Journal Climat*, 5 : 512-524.
- Fontaine B., Javier G.S., Pascal R., Belen R.F., Teresa L., Fabrice C., Sébastien G., Sivarajan S., Paolo R. & Serge J. (2009). Impacts of warm and cold situations in the Mediterranean basin on the West African monsoon : observed connection patterns (1979-2006) and climate simulations. *Climate Dynamic*, 35 : 95-114.
- Garen G.C. (1993). Revised surface water supply index for western United States. *Journal of water Resources Planning and Management*, 119(4) : 437-454.
- Gautier L. (2014). Contact forêt-savane Côte d'Ivoire central : évolution de la surface forestière de la réserve de Lamto (Sud du V-Baoulé). *Bulletin de la société Botanique de France Actualités Botaniques*, 164 : 628-641.
- GIEC (2013). Changements climatiques : Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. Genève, 27 p.
- Goula B.A., Issiaka S., Brou K., Vamoryba F. & Gnamien B.K. (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). *Revue en Sciences de l'Environnement Vertigo*, 7(1) : 20-24.
- Hubert P., Carbonnel J.P. & Chaouche A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques-application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal Hydrology*. 110 : 349-367.
- Janicot S., Harzallah A., Fontaine B. & Moron V. (1998). West African monsoon dynamics and eastern equatorial atlantic and pacific sst anomalies (1970-1988) . *Journal Climate*, 11 : 1874-1882.
- Kanohin F., Saley M.B., Ake G.E., Savane I. & Djé K.B. (2012). Variabilité climatique et productions de café et cacao en zone tropicale humide : cas de la région de Daoukro (Centre-est de la Côte d'Ivoire) *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 1(2) : 194-215.

- Kassin K.E., Doffangui K., Kouame B., Yoro G. & Assa A. (2008). Variabilité pluviométrique et perspectives pour la replantation cacaoyère dans le Centre Ouest de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 12 : 633-641.
- Khan S., Gabriel, H.F. & Rana, T. (2008). Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. *Irrigation and Drainage System*, 22 : 159–177.
- Kouadio G.B. (2004). La caractérisation de la variabilité climatique et de la sécheresse des ressources en eau de la Côte d'Ivoire : cas du bassin versant du N'Zi. Mémoire de DEA des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université d'Abobo-Adjamé, 71 p.
- Kouadio K.Y., Aman A., Ochou A.D., Ali K.E. & Assamoi P.A. (2011). Rainfall variability patterns in West Africa: case of Cote d'Ivoire and Ghana. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 5 : 1229–1238.
- L'Hôte Y., Mahé G., Somé B. & Triboulet J.P. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index updated from 1896 to 2000; the drought still goes on. *Hydrology. Science Journal*, 47(4) : 563–572.
- Lamotte M. (1967). Les batraciens de la région de Gpakobo (Côte d'Ivoire). *Sciences Naturelles*, 218-294.
- Le Barbé L. & Lebel T. (1997). Rainfall climatology of HAPEX-Sahel region during the year 1950-1990. *Journal of Hydrology*, 1(188) : 43-73.
- Le Barbé L., Lebel T. & Tapsoba D. (2002). Rainfall variability in West Africa during the years 1950–90. *Journal of Climate*, 2(15) : 187–202.
- Liebmann B., Dole R. M., Jones C., Blade I. & Allured D. (2010). Influence of choice of time period on global surface temperature trend estimates. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 11(91) : 1485–1491.
- Mahé G. & Olivry J.C. (1991). Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale du mensuel à l'interannuel. *Hydrology for the Water Management of Large River Basins*, 201 : 163-171.

- McKee T.B., Doesken N.J. & Kleist J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, du 17-22 Janvier 1993. Boston, Anaheim, California, pp 179–184.
- McKee T.B., Doesken N.J. & Kleist J., (1995). Drought monitoring with multiple timescales. *Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology*, 15-20 Janvier 1995, Dallas, pp 233–236.
- Moral P. (1964). Essai sur les regions pluviothermiques de l’Afrique de l’Ouest. *Annales De Geographie*, 400 : 660-686.
- Morel R. (1993). L’atlas agroclimatique des pays du CILSS. *Veille Climatique Satellitaire*, 45 : 37-45.
- Naresh K., Murthy M.C.S., Sessa Saib M.V.R. & Royb P.S. (2009). On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. *Meteorological Applications*, 16 : 381–389.
- Nathan W., Steve G. & Hayes M.J. (2004). A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate*, 17(12) : 2335-2351.
- Nicholson S.E. & Palao I. M., (1993). A re-evaluation of rainfall variability in the sahel. Part I. Characteristics of rainfall fluctuations. *International Journal of Climatology*, 4(13) : 371-389.
- Nicholson S.E. (1980). The nature of rainfall fluctuations in subtropical West Africa. *Monthly Weather Review*, 4(108) : 473–487.
- OMM (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution du groupe de travail III au quatrième rapport d’évaluation du Groupe d’Experts International sur l’Evolution du Climat, 29 p.
- OMM (2012). Guide d’utilisation de l’indice normalise de précipitations. Outils d’aide à la sécheresse, 17 p.
- ONERC (2018). Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique. Rapport de l’ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 199 p.

- Palmer W.C. (1968). Keeping track of crop moisture condition, nationwide : the new crop moisture index. *Weatherwise*, 21 : 156-161.
- Paturel J.E., Servat E., Kouame B., Boyer J.F. (1995). Manifestation de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne, cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Benin. *Bulletin sécheresse*, 1(6) : 95-102.
- Saha K.R. & Saha S. (2001). African monsoons. Part 1: Climatological structure and circulation. *Mausam*, 52 : 479-510.
- Saley M.B., Raoul T., Koffi F.K., Marie S.O., Boyossoro H.K., Eric V.D., Sésouba O., Ta M.Y., Kouadio A., Jean P.J., Issiaka S. & Jean B. (2009). Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas du district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). Université de Cocody, 18 p.
- Servat E., Paturel J.E., Lubes-niel H., Kouame B., Masson J.M., Travaglio M. & Marieu B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 2(12) : 363-387.
- Servat E., Paturel J.E. & Lubès H. (1996). La sécheresse gagne l'Afrique tropicale. *La Recherche*, 290 : 24-25.
- Sultan B. & Janicot S. (2003). The west Africa monsoon dynamics : Part II : The “preonset” and “onset” of the summer monsoon. *Journal of Climate*, 16 : 3407-3427.
- Sultan B. (2002). Étude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Application à la sensibilité des rendements agricoles. Ph D. These, université Paris 7-Denis Diderot, 288 p.
- 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.
- Tiemoko D.T., Yoroba F., Paris J.D., Diawara A., Berchet A., Pison I., Riandet A. & Ramonet M. (2020). Source-Receptor Relationships and Cluster Analysis of CO₂, CH₄, and CO Concentrations in West Africa: The Case of Lamto in Côte d'Ivoire. *Atmosphere*, 11(9) : 1-23.

- Wu H., Svoboda M.D., Hayes M.J., Wilhite D.A. & Fujiang, W. (2006). Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology* 27 : 65–79.
- Yao T.B. (2005). Climat, mutation socio-économique et paysage en Côte d’Ivoire. Mémoire de synthèse des activités de recherches. Université des Sciences et Technologie de Lille, 226 p.
- Yoroba, F., Kouassi, B.K., Diawara, A., Yapo, L.A.M., Kouadio, K., Tiemoko, D.T., Kouadio, Y.K., Koné, I.D. and Assamoi, P. (2019). Evaluation of Rainfall and Temperature Conditions for a Perennial Crop in Tropical Wetland: A Case Study of Cocoa in Côte d’Ivoire. *Advances in Meteorology*, 1-10.

RESUME

La présente étude porte sur une évaluation et caractérisation des séquences de sécheresse sur la période 1964-2019 dans la zone de Lamto. Les séquences de sécheresse qui ont des répercussions sur la disponibilité de l'eau, la production agricole et l'exploitation des cours d'eau, sont généralement identifiées à partir d'indices de sécheresse. L'indice utilisé est l'indice standardisé de précipitation (SPI) à l'échelle de 1, 3 et 12 mois basé sur les précipitations pour reproduire respectivement les épisodes de sécheresses météorologique, agricole et hydrologique et leur intensité observées dans la région. Les déficits pluviométriques historiques survenus de 1964 à 2019 ont également été examinés à partir de l'anomalie normalisée. Par ailleurs, l'analyse du SPI montre un bon accord avec les déficits pluviométriques enregistrés. Les sécheresses les plus graves qu'a connu la région se sont produites au cours des années 1970, 1983, 1993 et 2013. L'intensité des sécheresses s'est avérée légère à modérée, malgré la présence des cas de sécheresse sévère à extrême comme en 1982 pour la sécheresse météorologique avec un pic de -4,13 et une durée de 2 mois, en 1993 pour la sécheresse hydrologique avec un pic de -2.62 et une durée de 27 mois et en 2013 pour la sécheresse agricole avec un pic maximal de -3.5 et une durée de 6 mois.

Mots clés : Sécheresse, Indice standardisé, Météorologique, Agricole, Hydrologique

ABSTRACT

The present study focuses on an evaluation and characterization of drought sequences over the period 1964-2019 in the Lamto region. Drought sequences that affect water availability, agricultural production and river exploitation are generally identified from drought indices. The index used is the Standardized Precipitation Index (SPI) at 1, 3 and 12 month scales based on precipitation to reproduce respectively the meteorological, agricultural and hydrological drought episodes and their severities observed in the region. Historical rainfall deficits from 1964 to 2019 were also examined using the normalized anomaly and the analysis of the SPI shows good agreement with the recorded rainfall deficits. The most severe droughts in the region occurred in the 1970, 1983, 1993 and 2013. The intensity of the droughts was mild to moderate, despite the presence of severe to extreme droughts as in 1982 for meteorological drought with a peak of -4.13 and a duration of 2 months, in 1993 for hydrological drought with a peak of -2.62 and a duration of 27 months and in 2013 for agricultural drought with a peak of -3.5 and a duration of 6 months.

Keywords: Drought, Standardized index, Meteorological, Agricultural, Hydrological