

# Université Assane Seck de Ziguinchor



U.F.R Sciences et Technologies

Département de physique

**Mémoire de Master**

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan

## Variabilité et caractéristiques de la sécheresse au Sénégal de 1983 à 2016

Présenté par **Massamba DIOUF**

Sous la direction de **Dr Samo DIATTA**

Soutenu publiquement le 05/07/2022 devant le jury composé de :

<u>Prénom et Nom</u>	<u>Grade</u>	<u>Qualité</u>	<u>Etablissement</u>
Moctar CAMARA	Professeur Titulaire	Président	UASZ
Mamadou Lamine MBAYE	Maitre-Assistant	Rapporteur	UASZ
Demba GAYE	Assistant	Examineur	UASZ
Habib DIENG	Assistant	Examineur	UASZ
Samo DIATTA	Maitre de conférences	Encadrant	UASZ

# Dédicaces

---

*Je dédie ce travail,*

*À une personne dont les mots me manquent pour la qualifier tant son soutien m'a été précieux, je veux nommer maman Ndèye Maty FALL qui m'a accompagné depuis mon enfance sur tous les plans, sans oublier mon père Moussa DIOUF et ma mère Khady NDIAYE.*

*À mes oncles paternels et maternels, à mes frères et sœurs particulièrement Mame Coumba DIOUF, à mes cousins et cousines et à toutes mes tantes ; bref, à toute ma famille.*

*À tous mes amis d'enfance, plus précisément à Meissa DIOUM ma moitié, à tous les étudiants ressortissants de Bambey à Ziguinchor particulièrement à Ibrahima THIAM et à tous mes amis que j'ai eu à connaître durant mon cursus scolaire.*

*À Sokhna Khoudia FALL fille de Serigne Modou Ablaye FALL Ndar (petit fils de Mame Cheikh Ibrahima FALL).*

*Que DIEU vous garde et vous accorde sa bénédiction.*

# Remerciements

---

En l'entame de mes propos, je rends grâce à DIEU le MISÉRICORDIEUX, le TOUT PUISSANT, et l'OMNIPRÉSENT de nous avoir accordé la vie, la santé, jusqu'à arriver au bout de ce stage de Master. Je réitère mes prières et salut sur son élu et son messager le Prophète Mouhamed (*PSL*) sans oublier son Serviteur éternel Ahmadou Bamba Khadimoul Rassoul Allah ainsi que son disciple qui est la voie et la porte du mouridisme ; je veux nommer Mame Cheikh Ibrahima FALL et mon guide religieux Serigne Mor Talla FALL, qu'Allah lui accorde une longue vie et une santé de fer ainsi que toute sa famille.

Il sied de préciser d'ores et déjà que ce travail ne serait jamais réalisé sans l'apport d'une personne aux qualités inestimables. Sa bonté incomparable, son ouverture sans limite et sa générosité dans le partage de la connaissance; me sont inestimables mais je me résolve aux remerciements les plus sincères et des prières à son égard je veux nommer mon encadreur Dr Samo DIATTA. Il n'a ménagé aucun effort au bon déroulement de ce mémoire pour produire un travail de qualité. Je n'ai vraiment pas les mots pour lui exprimer mon contentement et ma gratitude.

Je remercie les enseignants chercheurs du département de Physique en particulier Dr Bamol Ali SOW, Dr Moctar CAMARA, Dr Mamadou Lamine MBAYE, Dr Habib DIENG, Dr Joseph DIATTA, Dr Ababacar NDIAYE, grossièrement je remercie tous les profs qui ont eu à intervenir en master SAO de l'Université Assane SECK de Ziguinchor pour nous dispenser des cours si précieux.

Je remercie aussi tous les chercheurs du Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC), M. Papa FALL depuis l'UGB ainsi que mes camarades de promotion pour l'aide qu'ils m'ont apportée. Un grand merci à tous mes amis de l'UASZ, sans oublier mes camarades de l'Université Alioune Diop, du lycée de Bambey et du CEM Bambey II.

Je ne saurais terminer sans remercier ma famille de m'avoir toujours soutenu incommensurablement et me pousser à aller de l'avant, mes amis d'enfance, les amis dont j'ai eu à rencontrer durant mon parcours, mes amis Baye Fall et mbokou talibé des dahira mourides.

Je tiens vraiment à remercier aussi les membres du jury d'avoir pris leurs temps pour examiner de fond en comble ce modeste travail et de m'avoir accordé un temps pour soutenir mes idées.

# Résumé

---

L'une des manifestations du changement climatique est la dynamique spatio-temporelle régressive de la pluviométrie caractérisée par des périodes sèches surtout dans les pays soudano-sahéliens en particulier le Sénégal. Ce dernier est un pays soumis régulièrement à des périodes de sécheresse. Ce phénomène s'accroît avec le réchauffement climatique, la sécheresse fait partie des phénomènes météorologiques extrêmes qui engendrent de graves conséquences environnementales, économiques et sociales.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude de la variabilité temporelle et spatiale ainsi que les caractéristiques de la sécheresse au Sénégal sur la période de 1983 à 2016. L'indice de précipitations et d'évapotranspirations standardisés (SPEI) a été utilisé pour comprendre l'évolution spatiale et temporelle de la sécheresse sur l'ensemble du territoire sénégalais. Quatre échelles de temps de l'indice SPEI à savoir SPEI-01, SPEI-03, SPEI-06 et SPEI-12 ont été utilisées. Les variations annuelles et saisonnières ont montré un léger dessèchement sur toute l'étendue de la zone d'étude particulièrement dans le nord. L'analyse en composante principale a permis d'avoir un aperçu sur la structure distributionnelle temporelle de la sécheresse. Ainsi, une fluctuation de décades sèche et humides a été observée au cours de la période d'étude. Dans cette étude, le test de Mann-Kendall a été aussi utilisé pour étudier les tendances de sécheresse au Sénégal. Le test a montré dans son ensemble des tendances de sécheresse météorologique significativement positives. Néanmoins les tendances de sécheresse hydrologique sont à la baisse. Les caractéristiques telles que la durée et la sévérité ont noté un assèchement sur tout le Sénégal. Cette sécheresse est beaucoup plus frappante au nord et au centre du pays. Plus la durée de la sécheresse est longue, plus la sécheresse est sévère. Les sécheresses météorologique et édaphique sont moins sévères que celle hydrologique. Ainsi, les résultats de cette étude ont montré que tout le pays est touché par une sécheresse météorologique, de plus toute la partie nord est frappée aussi par une sécheresse agricole. Ces résultats permettent de comprendre les schémas spatiaux et temporels des événements de sécheresse, qui sont très importants pour la prise de décision.

**Mots clés :** Sécheresse, variabilité, caractéristique, Sénégal

# Abstract

---

One of the manifestations of climate change is the regressive spatio-temporal dynamics of rainfall characterized by dry periods especially in the Sudano-Sahelian countries, particularly Senegal. The latter is a country regularly subject to periods of drought. This phenomenon is accentuated with global warming, drought is one of the extreme meteorological phenomena that have serious environmental, economic and social consequences.

In this work we are interested in the study of temporal and spatial variability as well as the characteristics of drought in Senegal over the period from 1983 to 2016. The standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI) was used to understand the spatial and temporal evolution of drought over the entire Senegalese territory. Four time scales of the SPEI index namely SPEI-01, SPEI-03, SPEI-06 and SPEI-12 were used. The annual and seasonal variations showed a slight drying over the entire extent of the study area, particularly in the north. The principal component analysis provided insight into the temporal distributional structure of drought. Thus, a fluctuation of dry and wet decades was observed during the study period. In this study, the Mann-Kendall test was also used to study drought trends in Senegal. Overall, the test showed significantly positive meteorological drought trends. However, hydrological drought trends are decreasing. Characteristics such as duration and severity noted a drying up all over Senegal. This drought is much more striking in the north and center of the country. The longer the duration of the drought, the more severe the drought. The meteorological and edaphic droughts are less severe than the hydrological one. Thus, the results of this study showed that the whole country is affected by a meteorological drought, moreover the whole northern part is also hit by an agricultural drought. These results allow to understand the spatial and temporal patterns of drought events, which are very important for decision-making.

**Keywords:** Drought, variability, characteristic, Senegal

# Liste des acronymes et des sigles

---

**ACP** : Analyse en composante principale

**CCNUCC** : Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

**CEM** : Collège d'Enseignement Moyen

**CHIRPS** : Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

**CPC** : Centre de prévision climatique

**CRU-ST** : Séries temporelles de l'Unité de recherche climatique

**ETP** : Evapotranspiration Potentielle

**FAO** : organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

**GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

**GLEAM** : Global Livestock Environmental Assessment Model

**GPCC-DI** : Global Precipitation Climatology Center Drought Index

**IPCC** : Intergovernmental Panel on Climate Change

**JJAS** : Juin Juillet Août Septembre

**LOSEC** : Laboratoire d'Océanographie, des sciences de l'Environnement et du Climat

**MODIS** : Spectroradiomètre d'Imagerie à Résolution Modérée

**NDVI** : Indice de Végétation par Différence Standardisé

**NOAA** : National Oceanic and Atmospheric Administration

**OMM** : Organisation Météorologique Mondiale

**P** : Précipitation

**PC** : Composante Principale

**PDSI** : Palmer Drought Severity Index

**RSM** : L'Humidité du Sol de la zone Racinaire

**SAO** : Science de l'Atmosphère et de l'Océan

**SPEI** : Indice de Précipitations et d'évapotranspirations standardisés

**SPEI-HR** : Indice de Précipitations et d'évapotranspirations standardisés à Haute Résolution

**SPI** : Indice de Précipitations standardisés

**SWI** : Soil Wetness Index

**T** : Température

**UADB** : Université Alioune Diop de Bambey

**UASZ** : Université Assane Seck de Ziguinchor

**UFR** : Unité de Formation et de Recherche

**UGB** : Université Gaston Berger

# Liste des figures

---

<b>Figure 1 :</b> Zones climatiques d’Afrique de l’ouest basées sur les niveaux des précipitations ..	4
<b>Figure 2.</b> Relation entre les différents types de sécheresse .....	9
<b>Figure 3.</b> La Régions du Sénégal.....	13
<b>Figure 4.</b> Définition des événements de sécheresse basée sur l'indice de sécheresse à l'aide de la théorie des runs (Wang et al., 2020).....	23
<b>Figure 5.</b> Distribution spatiale de la variation moyenne de l’indice de précipitation et d’évapotranspiration standardisé (SPEI-01,03, 06 et 12) sur la période de 1983 à 2016 au Sénégal. ....	26
<b>Figure 6.</b> Distribution spatiale de la variation saisonnière (JJAS) de l’indice de précipitation et d’évapotranspiration standardisé (SPEI01, 03, 06 et 12) sur la période de 1983 à 2016 au Sénégal. ....	27
<b>Figure 7.</b> Variabilité spatio-temporelle des quatre composantes du SPEI-HR-01 au Sénégal sur la période de 1983 à 2016. Les représentations spatiales à gauche, tandis que celles des variations temporelles à droite. ....	29
<b>Figure 8.</b> Variabilité spatio-temporelle des quatre composantes du SPEI-HR-03 au Sénégal sur la période de 1983 à 2016. Les représentations spatiales à gauche, tandis que celles des variations temporelles à droite. ....	30
<b>Figure 9.</b> Variabilité spatio-temporelle des quatre composantes du SPEI-HR-06 au Sénégal sur la période de 1983 à 2016. Les représentations spatiales à gauche, tandis que celles des variations temporelles à droite. ....	31
<b>Figure 10.</b> Variabilité spatio-temporelle des quatre composantes du SPEI-HR-12 au Sénégal sur la période de 1983 à 2016. Les représentations spatiales à gauche, tandis que celles des variations temporelles à droite. ....	32
<b>Figure 11.</b> Distribution spatiale des tendances annuelles des SPEI au Sénégal sur la période 1983-2016. Les couleurs bleues ombrés et rouges ombrés indiquent respectivement les tendances significativement à la baisse et à la hausse.....	36
<b>Figure 12.</b> Distribution spatiale des tendances saisonnières (JJAS) des SPEI au Sénégal sur la période de 1983-2016. Les couleurs bleues ombrés et rouges ombrés indiquent respectivement les tendances significativement à la baisse et à la hausse. ....	37
<b>Figure 13.</b> Variations spatiales de la durée de sécheresse au Sénégal entre 1983 et 2016.....	39
<b>Figure 14.</b> Variations spatiales de la sévérité de sécheresse au Sénégal entre 1983 et 2016..	41



# Tables des matières

<b>Dédicaces .....</b>	<b>I</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>II</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IV</b>
<b>Liste des acronymes et des sigles.....</b>	<b>V</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>VII</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1. Généralités sur le changement climatique et la sécheresse.....</b>	<b>3</b>
Introduction.....	3
1.1 Le Climat et les changements climatiques .....	3
1.1.1 Climat et définitions .....	3
1.1.2 Les changements climatiques.....	5
1.1.3 Les effets du changement climatique .....	6
1.2 La sécheresse.....	6
1.2.1 Définition de sécheresse .....	6
1.2.2 Types de sécheresse .....	7
1.2.2.1 Sécheresse météorologique .....	7
1.2.2.2 Sécheresse agricole .....	7
1.2.2.3 Sécheresse hydrologique.....	8
1.2.2.4 Sécheresse socio-économique .....	8
1.2.3 Relation entre les types de sécheresse .....	8
1.2.4 Conséquences et impacts de la sécheresse .....	10
Conclusion .....	11
<b>Chapitre 2. Données et méthodes.....</b>	<b>12</b>
Introduction.....	12
2.1.1 Situation géographique du Sénégal.....	12
2.1.2 Situation climatique du Sénégal .....	13
2.2 Les données utilisées.....	14

2.2.1	Indice de précipitations et d'évapotranspirations standardisés (SPEI).....	14
2.2.2	Calcul du SPEI-HR sur l'Afrique.....	16
2.2.3	Critères d'évaluation .....	17
2.3	Méthodes utilisées .....	18
2.3.1	Analyse en composante principale.....	18
2.3.2	Test de Mann Kendall.....	20
2.3.3	Caractéristiques de la sécheresse .....	22
2.3.3.1	Exemple d'applications de la théorie des Runs.....	23
	Conclusion .....	24
<b>Chapitre 3 : Résultats et discussions .....</b>		<b>25</b>
3.1	Variation spatiale moyenne des SPEI au Sénégal de 1983 à 2016.....	25
3.1.1	Variation moyenne annuelle des SPEI.....	25
3.1.2	Variation saisonnière des SPEI .....	27
3.2	Structure spatio-temporelle des indices de sécheresse.....	28
3.3	Les tendances de la sécheresse au Sénégal .....	35
3.4	Les caractéristiques de la sécheresse au Sénégal .....	39
3.4.1	Durée moyenne des sécheresses au Sénégal.....	39
3.4.2	Sévérité moyenne des sécheresses au Sénégal.....	41
	Conclusion .....	43
<b>Conclusion générale .....</b>		<b>44</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>		<b>46</b>
<b>Webographie.....</b>		<b>54</b>

# Introduction générale

---

Aujourd'hui, les questions du changement climatique ou du réchauffement global de la terre font l'objet d'une attention considérable de la part de divers chercheurs du monde entier. Scientifiques, décideurs et gouvernements cherchent à comprendre la nature des changements et les défis auxquels ils doivent faire face. L'effet du réchauffement climatique ne fait qu'augmenter avec l'apparition de plus en plus fréquente des phénomènes météorologiques extrêmes (par exemple, les inondations, les tempêtes de pluie et les sécheresses). Le phénomène extrême auquel nous nous intéressons dans ce travail est celui de la sécheresse. Elle est un phénomène exceptionnel par rapport aux autres phénomènes du fait qu'elle s'installe lentement et se développe au cours des mois voire même des années. Ses impacts sociaux, économiques et environnementaux s'exacerbent davantage (Chiheam, 2004). La sécheresse peut toucher n'importe quel pays qui réunit les conditions climatiques suivantes : baisses des précipitations pendant une certaine durée accompagnée de températures élevées et de fortes évapotranspirations. Certaines zones sont plus vulnérables que d'autres et seules les zones polaires et subpolaires sont épargnées par la sécheresse car elles sont pour la plupart recouvertes de glace. Parmi les zones les plus touchées par des périodes de sécheresse, on compte les zones tropicales et subtropicales situées entre les tropiques du Cancer et du Capricorne. Ce sont en effet les zones qui ont le climat le plus chaud et sec. Les sécheresses les plus marquantes en Afrique ces dernières années concernent la Corne de l'Afrique et les pays du Sahel dont le Sénégal.

La sécheresse est un phénomène naturel caractérisé par un manque d'eau sur une durée suffisamment longue pour affecter les sols et la végétation. Elle est aussi un événement climatique exceptionnel et indéniable avec notamment des températures élevées et un déficit de précipitations. Cette sécheresse a affecté les pays du Sahel à partir de la fin des années soixante et elle a mobilisé à l'époque l'attention de l'opinion publique internationale. Il est intéressant, près de quelques dizaines d'années plus tard, de mesurer, au-delà des causes, dont l'analyse a été sujette à polémique, et des effets immédiats et tristement spectaculaires de cette dégradation de la pluviométrie, des conséquences plus profondes et durables de celle-ci. Cette crise climatique a touché le Sénégal qui est, pour une partie de son territoire, un pays du Sahel régulièrement soumis à de graves sécheresses (Roquet, 2008).

Ce travail a comme objectif général de fournir une analyse sur la variation de la sécheresse au Sénégal au cours de la période de 1983 à 2016. Plus spécifiquement, il s'agit de :

- ✓ déterminer les variations spatiales annuelles et saisonnières de la sécheresse,
- ✓ faire une étude sur la structure spatio-temporelle de la sécheresse,
- ✓ montrer les tendances annuelles et saisonnières sur la période d'étude,
- ✓ déterminer les caractéristiques de la sécheresse à savoir la durée et la sévérité.

Ce mémoire se décline sous trois chapitres : le premier donne un aperçu général sur le changement climatique et une généralité sur les sécheresses. Le second chapitre s'intéresse à la présentation de la zone d'étude, à l'explication des données et méthodes utilisées pour réaliser ce travail. Et enfin, le troisième chapitre expose les différents résultats obtenus ainsi les interprétations et les conclusions abouties. Une conclusion et des perspectives bouclent ce présent travail.

# Chapitre 1. Généralités sur le changement climatique et la sécheresse

---

## Introduction

Ce chapitre rassemble quelques informations techniques et scientifiques utiles à la compréhension de la sécheresse. La première partie de ce chapitre met en évidence le climat, les changements climatiques et ses effets. La seconde partie présente les généralités sur la sécheresse en explicitant les différents types de sécheresse, leurs relations ainsi que ses effets et impacts.

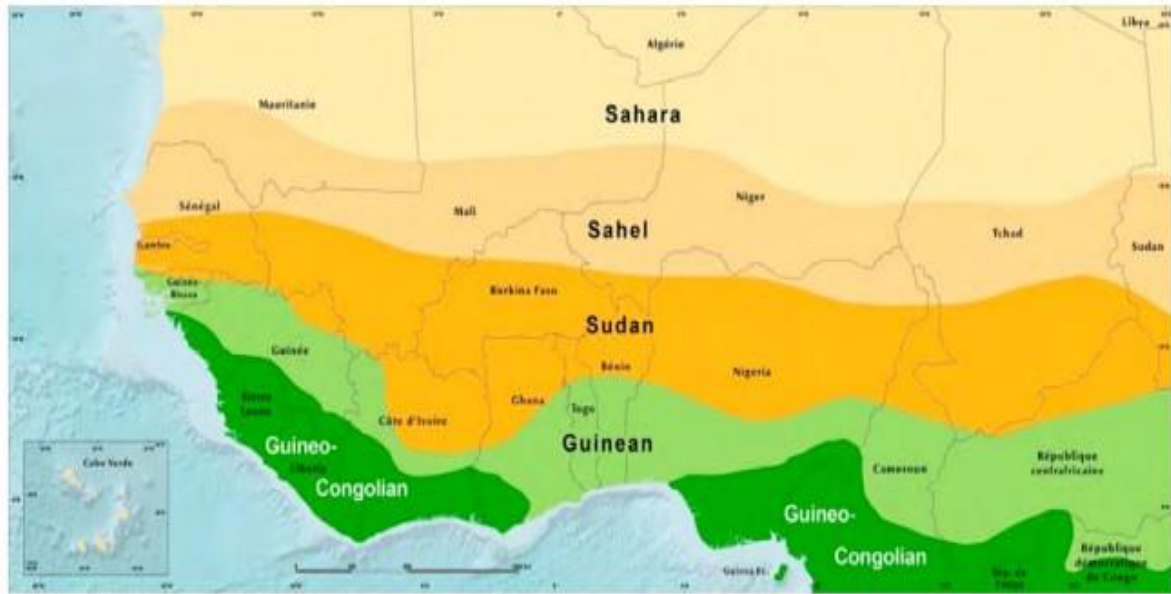
## 1.1 Le Climat et les changements climatiques

### 1.1.1 Climat et définitions

Le climat est la moyenne des temps intégrée sur une longue période avec des caractères relativement constants mesurés sur trente ans par exemple. L'étude du climat se distingue de la météorologie qui désigne l'étude des temps à court terme et dans des zones ponctuelles. La climatologie étudie les composantes et les variations du climat sur la surface de la terre.

Le climat de l'Afrique de l'Ouest connaît des épisodes très particulièrement irréguliers, un fort ensoleillement suivi de pluies abondantes, parfois de violents orages. Ce climat a été toléré depuis des générations, mais le changement tend à être radical avec des saisons sèches beaucoup plus longues. Avec une sécheresse persistante, la terre, asséchée par cette forte chaleur, devient parfois imperméable à la pluie causant ainsi des inondations. En Afrique de l'ouest, on distingue différents types de climats basés sur les niveaux des précipitations permettant aussi de définir les grandes régions de l'Afrique de l'Ouest (Figure 1). Ainsi l'importance des précipitations s'étendent des zones :

- ✓ Désertiques au Nord (Saharien avec une pluviométrie annuelle  $< 200$  mm),
- ✓ Sahéliennes au centre (climat semi-aride chaud avec une pluviométrie annuelle comprise entre 200 mm et 600 mm),
- ✓ Soudaniennes en allant vers le Sud (climat de savane à hiver sec et une pluviométrie annuelle comprise entre 600 mm et 1200 mm)
- ✓ Guinéennes dans la zone méridionale de la région (climat tropical humide ou de mousson à pluviométrie annuelle  $> 1200$ mm).



(source : <https://www.peuplesdumonde.voyagesaventures.com/lageographie/g%C3%A9ographie-de-l-afrique/afrique-de-l-ouest/item/567-les-r%C3%A9gions-ethno-climatique-de-l-afrique-de-l-ouest.html>)

**Figure 1** : Zones climatiques d’Afrique de l’ouest basées sur les niveaux des précipitations

Étant un pays de l’Afrique de l’ouest, le Sénégal a de grands traits climatiques qui sont le résultat conjoint de facteurs géographiques et aérologiques. Les premiers s’expriment par la latitude qui confère au territoire des caractères tropicaux, et par la position de finistère ouest-africain qui détermine des conditions climatiques différentes dans la région littorale et à l’intérieur. Les seconds s’expriment par l’alternance sur le pays de trois flux dont les déplacements sont facilités par la platitude du relief.

Le premier flux est représenté par l’alizé maritime issu de l’anticyclone des Açores, de direction nord à nord-ouest L’alizé maritime est constamment humide, frais voire froid en hiver, et marqué par une faible amplitude thermique diurne. Son domaine est une frange côtière qui s’amenuise au sud avec la remontée de la mousson, mais qui se maintient pendant presque toute l’année au nord du Cap-Vert.

L’harmattan, un vent du nord-est, branche finissante de l’alizé continental sahélien. Il est caractérisé par un vent chaud et sec liée à son long parcours continental, et par des amplitudes thermiques très importantes. Il fait frais ou froid la nuit, chaud à torride le jour. Il transporte souvent en suspension de fines particules de sable et des poussières qui constituent la brume sèche.

Le troisième flux est la mousson, cette dernière provient de l'alizé issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène dans l'Atlantique Sud. Elle bénéficie d'un très long trajet maritime qui la rend particulièrement humide. Elle pénètre dans le pays en période estivale selon une direction Sud-Est Nord-Ouest et s'assèche relativement en fonction de sa pénétration vers l'intérieur. Elle est marquée par une faible amplitude thermique, mais avec des températures généralement plus élevées que celles de l'alizé maritime (Pascal, 2000).

L'Afrique de l'Ouest ne détient pas le monopole des conditions météorologiques imprévisibles. Nous les observons partout. Des cyclones et typhons dans le Pacifique à la fonte des glaces polaires, en passant par les ouragans dans l'Atlantique, la sécheresse et les tornades aux États-Unis, sont autant de conditions météorologiques imprévisibles et tout le monde doit s'adapter. Mais l'Afrique de l'Ouest, en particulier le Sénégal qui est, pour une partie de son territoire, un pays du Sahel doit attirer toute notre attention car étant reconnu comme l'un des pays régulièrement soumis aux effets du changement climatique.

### **1.1.2 Les changements climatiques**

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est un organe international des Nations Unies créé en 1988 afin d'évaluer sans parti pris la question du changement climatique. Il regroupe des milliers de scientifiques qui définissent le changement climatique comme : *« variation de l'état du climat, qu'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus.*

Cette définition diffère de celle qui figure dans la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Selon cette dernière, les changements climatiques désignent des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables (Haywood et Schulz, 2007).

Selon l'agence parisienne du climat, on parle de changement climatique ou de dérèglement climatique quand on note des changements importants dans les phénomènes climatiques : plus de canicules, ou inversement plus de précipitations, fréquence des tempêtes ou des ouragans plus élevés, etc.

### **1.1.3 Les effets du changement climatique**

L'Afrique de l'Ouest particulièrement le Sénégal est touché par la hausse des températures qui bouleverse les conditions climatiques et perturbe l'équilibre naturel habituel. Cette situation présente de nombreux risques pour les êtres humains comme pour l'environnement au cours du 21ème siècle. Parmi ces effets, selon Antipolis, 2008, on peut en citer.

- ✓ La diminution des précipitations,
- ✓ La hausse des températures,
- ✓ L'augmentation du nombre et de l'intensité des évènements extrêmes,
- ✓ La hausse possible du niveau de la mer,

Tous ces impacts se superposent et amplifient les pressions liées aux activités humaines déjà existantes sur l'environnement naturel.

Les répercussions de ces impacts sur l'environnement sont les suivantes (Ciheam, 2004)

- ✓ La diminution de la mobilisation des eaux de surface due à une baisse du ruissellement superficiel et à une fréquence de plus en plus grande des périodes de sécheresse,
- ✓ La dégradation accélérée des sols par l'accroissement de l'érosion hydrique et éolienne, et leur salinisation due à une plus forte évaporation doublée d'une baisse des pluies,
- ✓ La surexploitation des nappes d'eau souterraines,
- ✓ L'accentuation de la vulnérabilité des cultures pluviales provoquée par une augmentation de l'évapotranspiration et une disponibilité plus faible des eaux de précipitations.

## **1.2 La sécheresse**

### **1.2.1 Définition de sécheresse**

La sécheresse se définit comme un déficit en précipitations s'étendant sur de longues périodes, et menant à une pénurie en eau pour un ou différents secteurs d'activité. Techniquement, elle peut être identifiée par un écart aux conditions historiques moyennes de précipitation et/ou de température menant à la diminution du contenu en eau des sols (Lajoie et al., 2016).

Le terme sécheresse en général se rapporte à un épisode de manque d'eau plus ou moins long mais suffisant pour que les sols, la flore et la faune en soient affectées. Ce phénomène peut toucher une zone localisée comme un sous-continent entier. Si certaines zones sont plus vulnérables, des épisodes de sécheresse peuvent frapper presque n'importe quel endroit du



globe. Suivant les régions du monde et leurs ressources en eau, la définition de l'état de sécheresse varie (Lajoie et al., 2016)

Cependant, la sécheresse ne doit pas être confondue avec l'aridité. La sécheresse se manifeste dans le temps tandis que l'aridité est un phénomène spatial (elle est limitée dans les régions à faible précipitation) (Layelmam, 2008).

## **1.2.2 Types de sécheresse**

La sécheresse est aussi définie selon les différents secteurs qui interagissent avec ses effets. On peut donc définir une sécheresse du point de vue météorologique, agricole, hydrologique ou socio-économique. (Michele, 1996)

### ***1.2.2.1 Sécheresse météorologique***

Les sécheresses météorologiques sont caractérisées par un déficit des précipitations. (Ouranos, 2016; Palmer, 1965). Ainsi, il s'agit d'une période, qui peut varier du mois à l'année, voire dans des cas extrêmes, à plusieurs années, durant laquelle les précipitations sont inférieures à la normale.

La sécheresse du type météorologique est un phénomène naturel dû à des causes multiples (déficit de précipitation, température élevée etc.), qui varient d'une région à l'autre. ("Déclaration de l'OMM Sur l'état Du Climat Mondial En 2005," 2006)

### ***1.2.2.2 Sécheresse agricole***

Les sécheresses agricoles (ou édaphiques) sont caractérisées par un déficit lié à la réserve en eau du sol. Il s'agit d'une période durant laquelle l'humidité du sol est inférieure à sa valeur moyenne, ce qui a des conséquences directes sur la végétation, qu'elle soit naturelle ou cultivée (Palmer, 1965; Wilhelmi et al., 2002). Ces sécheresses sont généralement provoquées par un cumul des précipitations inférieur à la normale (Narasimhan & Srinivasan, 2005), mais peuvent parfois être engendrées par des taux d'évapotranspiration plus élevés (Beguería et al., 2010; Klocke & Hergert, 1990; Rind et al., 1990) ou des processus de ruissellement plus intenses, en comparaison à la normale saisonnière. Les sécheresses agronomiques ont souvent de lourdes conséquences sur la production agricole (Panu & Sharma, 2002)

### ***1.2.2.3 Sécheresse hydrologique***

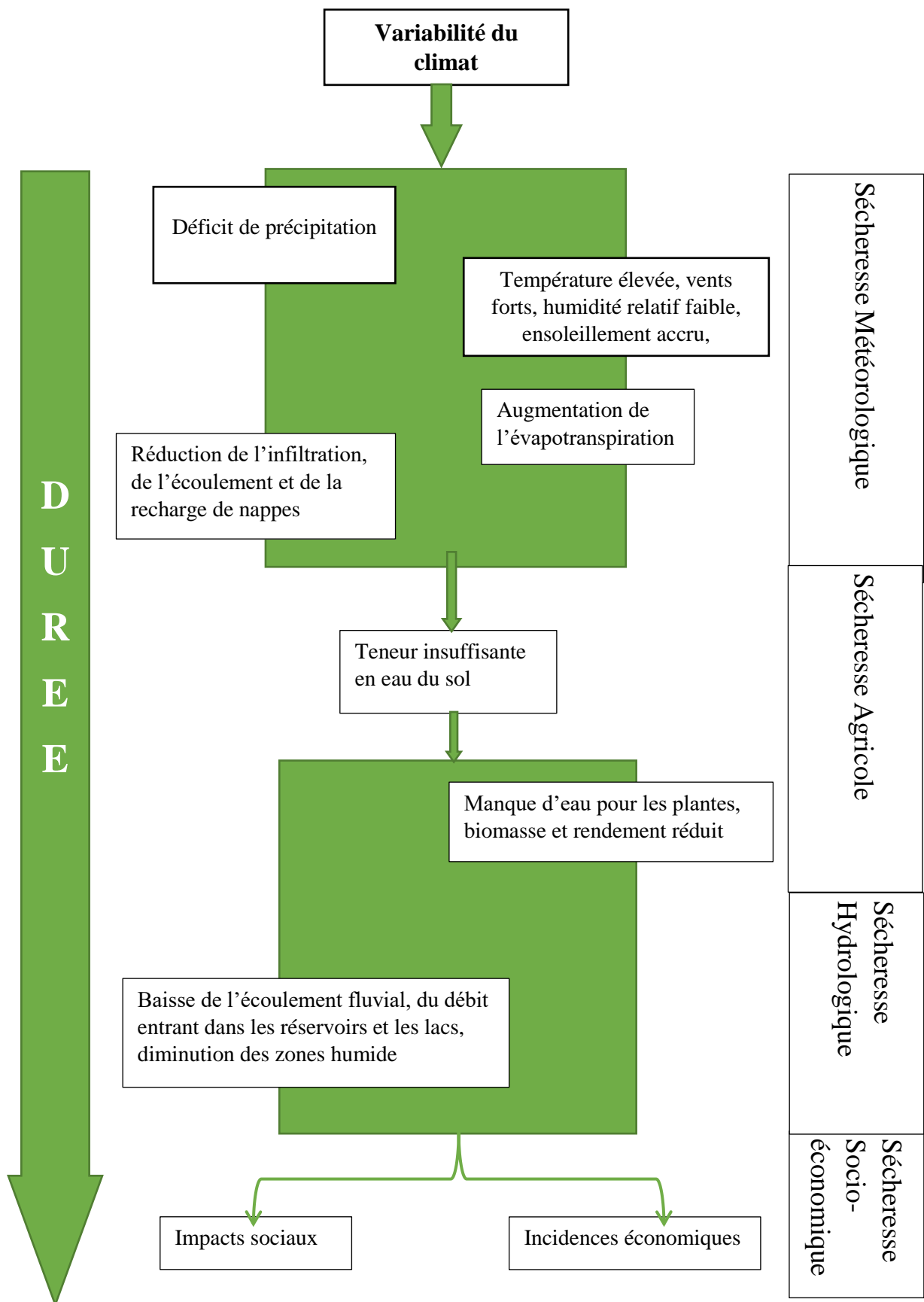
Elle correspond à une diminution des réserves d'eau dans les cours d'eau, les réservoirs de surface et la nappe phréatique. La sécheresse hydrologique est causée par un manque de précipitations accompagné d'une évaporation massive. Cependant, des facteurs non météorologiques, comme la demande en eau, la disponibilité de réservoirs de surface et le forage de puits artésiens, en aggravent l'effet ("Déclaration de l'OMM Sur l'état Du Climat Mondial En 2005," 2006).

### ***1.2.2.4 Sécheresse socio-économique***

Elle diffère fortement des autres types de sécheresse du fait qu'elle reflète la relation entre l'offre et la demande de certaines denrées ou de certains biens économiques (i.e. grains, fourrage, énergie hydro-électrique, etc.) qui sont tributaires des précipitations ("Déclaration de l'OMM Sur l'état Du Climat Mondial En 2005," 2006).

## **1.2.3 Relation entre les types de sécheresse**

Dans la figure 2, les relations entre les différents types de sécheresse ont été illustrées. Une sécheresse météorologique limitée dans le temps (par exemple en automne) peut provoquer une sécheresse agricole de durée plus longue (par exemple saisonnière de début de cycle) puis une sécheresse hydrologique plus persistante dans le temps. Ces deux dernières ont directement une influence sur la sécheresse socio-économique qui définit le lien entre l'offre et la demande d'un bien économique (Deboukh et Becharef, 2019).



**Figure 2.** Relation entre les différents types de sécheresse

## 1.2.4 Conséquences et impacts de la sécheresse

Les conséquences de la sécheresse peuvent s'étendre sur de nombreuses années et sont souvent suivies de grandes ampleurs qui rendent les populations déjà touchées encore plus vulnérables. Parmi les conséquences et les impacts, nous avons :

- ✓ Les conséquences sur la flore

Après une période de sécheresse, on voit des arbres secs et déshydratés qui finissent par mourir et une végétation très sèche peut faciliter des départs de feux, émetteurs de gaz nocifs qui polluent l'atmosphère et accentuent l'effet de serre.

- ✓ Les conséquences sur la faune

L'abaissement du niveau des cours d'eau observé en cas de sécheresse affecte la survie des poissons ainsi que des animaux qui s'abreuvent dans des points d'eau. Cela peut provoquer alors des migrations pour trouver de l'eau entraînant un déséquilibre de l'écosystème.

- ✓ Les conséquences sur les sols

Certains sols asséchés ne sont plus en capacité d'absorber correctement les précipitations après une période de sécheresse et cela peut provoquer des crues, des inondations et des glissements de terrain.

- ✓ Les conséquences sur l'Homme

Les populations les plus fragiles (bébés, enfants et personnes âgées) risquent une déshydratation qui peut leur être fatale pendant la période de sécheresse car ils n'ont pas le réflexe de boire pour compenser le manque d'eau dans leur organisme. Dans les pays qui n'ont pas facilement accès à l'eau, la sécheresse aggrave le risque de famine et d'épidémies en raison de la malnutrition. Elle augmente les migrations climatiques des populations touchées et peut entraîner des conflits entre peuples.

- ✓ Les impacts sur l'agriculture

Un déficit hydrique induit une diminution des réserves d'eau qui sont dès lors trop faibles pour irriguer correctement les cultures. Ainsi, la production agricole diminue et l'on observe une baisse voire des pertes de récolte.

- ✓ Les impacts sur l'alimentation en eau

La sécheresse entraîne un rabattement du niveau des rivières, lacs, fleuves et nappes phréatiques et des restrictions d'eau pour l'irrigation des cultures, les usages domestiques de l'eau ou les usages industriels. En milieu rural, l'eau peut être rationnée, voire coupée.

- ✓ Les impacts sur la qualité de l'eau

Les polluants se diluent moins en cas de sécheresse et cela augmente le risque de contamination des réserves hydriques.

- ✓ Les impacts sur les industries

On assiste à un arrêt de certaines usines consommatrices d'eau. Par exemple, le refroidissement par l'eau de certaines centrales nucléaires va poser problème en cas de pénurie et de canicule. Et cela réduit la production d'électricité alors même que les besoins sont accrus : ventilateurs, climatisation, réfrigérateur... sont très consommateurs d'électricité.

## **Conclusion**

Ce chapitre a permis d'avoir un aperçu général sur les différentes notions du phénomène de la sécheresse qui n'est rien d'autre qu'un déficit de pluviométrie ou les besoins en eau ne sont pas satisfaits

Connaissant les types de sécheresse, leurs relations ainsi que ses conséquences et impacts, étant aussi l'un des phénomènes météorologiques extrêmes qui perturbent la biodiversité, la sécheresse reste une menace majeure dans certaines zones du monde notamment les pays du sahel en particulier le Sénégal.

# Chapitre 2. Données et méthodes

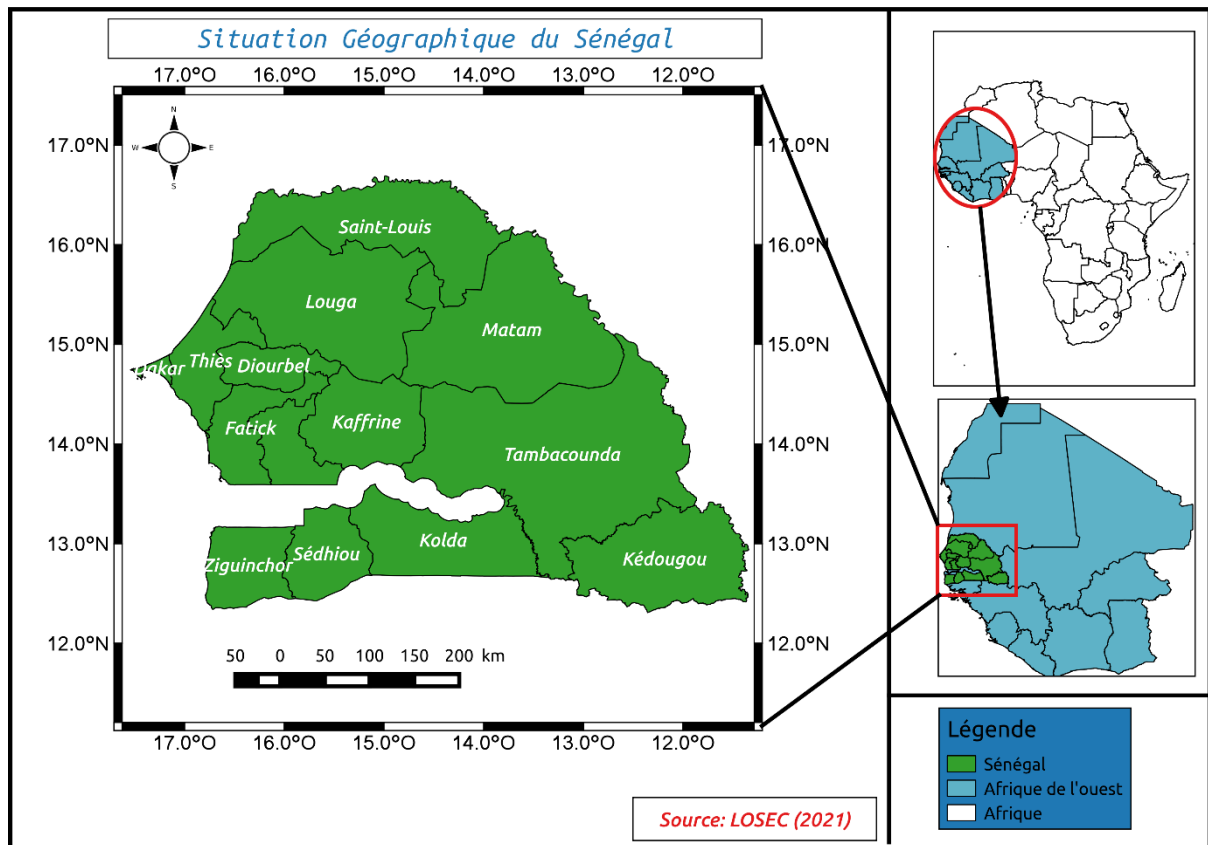
---

## Introduction

Ce chapitre est composé de quatre parties principales, d'abord un aperçu général sur la situation géographique et climatique du Sénégal qui est la zone d'étude, est présenté. Ensuite les différentes données utilisées dans ce travail sont mises en valeur. Enfin la troisième partie est consacrée à la présentation des méthodes utilisées notamment l'analyse de composantes principales (ACP) utilisé pour produire la distribution spatio-temporelle des indices de sécheresse sur le Sénégal, le test de Mann Kendall pour mettre en évidence les tendances de la sécheresse au Sénégal. Les caractéristiques relatives à la durée et à la sévérité de la sécheresse sont également présentées dans cette partie.

### 2.1.1 Situation géographique du Sénégal

Le Sénégal se situe à l'avancée la plus occidentale du continent africain dans l'Océan Atlantique. Etant un pays de l'Afrique de l'Ouest, le Sénégal est compris entre 12°8 et 16°09 de latitude nord et 11°21 et 17°32 de longitude ouest (Figure 3). Sa superficie est de 196 722 km<sup>2</sup>, dont 97,9% de terre et 2,1% d'eau. Il est limité au nord par la Mauritanie, à l'est par le Mali, au sud par la Guinée et la Guinée Bissau, à l'ouest par l'Océan Atlantique sur une façade de 530 km environ. Le pays est traversé par trois fleuves d'est en ouest dont le Sénégal (1700 km) au nord, la Gambie (750 km) et la Casamance (300 km) au sud.



**Figure 3.** La Régions du Sénégal

### 2.1.2 Situation climatique du Sénégal

Le climat du Sénégal est du type soudano-sahélien, ses climats appartiennent à la catégorie des climats tropicaux secs. Ce qui signifie qu'il peut souffrir de façon saisonnière d'un déficit significatif en eau. Le climat Sénégalais est diversifié, au nord on a un climat du type Sahélien et au sud le climat est du type tropical. L'année climatique est divisée en deux saisons principales par le critère pluviométrique.

- ✓ Une saison sèche de novembre à mai avec des alizés continentaux
- ✓ Une saison humide de juin à octobre avec des pluies de mousson

De manière générale, l'ouest du pays, représenté par le littoral, connaît des températures plus fraîches que l'est grâce à l'océan. Le centre et l'Est du pays connaissent des températures continentales très chaudes pendant la journée, et fraîches la nuit. L'écart de température peut être important entre le littoral et l'intérieur du pays, de l'ordre d'une dizaine de degrés. Ainsi on enregistre plus de 40° C à l'intérieur des terres pendant l'été.

Cinq (5) grandes zones de variation du climat tropical se distinguent du Nord au Sud :

- ✓ La zone sahélienne : entre Rosso et Matam / Louga (désertification en progression, arbustes, quelques baobabs, acacias)
- ✓ La zone sahélo-soudanienne : de Matam / Louga à Fatick (savane sèche, acacias, fromagers, baobabs)
- ✓ La zone soudanienne : de Fatick à la Haute-Casamance (savane plus dense, forêts clairsemées de baobabs, de fromagers, d'acacias, de palmiers)
- ✓ La zone soudano-guinéenne : de la Haute-Casamance à Kolda (savanes et forêts très denses avec des fromagers, baobabs, palmiers, filaos, rôniers...)
- ✓ La zone guinéenne : sud de la Casamance (forêt tropicale humide)

Enfin, le climat du Sénégal, comme celui de tous les pays sahélo-soudaniens, se caractérise par une grande variabilité des précipitations d'une année à l'autre, variabilité d'autant plus marquée que la moyenne annuelle est plus faible. Ainsi, à Ziguinchor la moyenne de 1 250 mm résulte de précipitations variant d'environ 900 mm à un peu plus de 1400 mm d'une année à l'autre. A Linguère la moyenne de 414 mm recouvre des précipitations allant de plus de 850 mm en année exceptionnellement pluvieuse à moins de 200 mm en année sèche. C'est dire que l'irrégularité climatique qui pèse sur la moitié septentrionale du pays n'est pas seulement le fait de la faiblesse des précipitations et de la brièveté de la saison pluvieuse. Elle est surtout le résultat de l'irrégularité interannuelle des pluies. La sécheresse qui a périodiquement frappé le pays depuis 1968 a souligné la gravité de cette situation par ses conséquences dramatiques sur l'équilibre écologique et toutes les activités humaines des régions situées au nord du Saloum (Pascal, 2000).

## **2.2 Les données utilisées.**

### **2.2.1 Indice de précipitations et d'évapotranspirations standardisés (SPEI)**

Il n'y a pas de meilleur indice de sécheresse pour tous les types de sécheresse (Van Loon, 2015). Chaque indice est conçu pour un type de sécheresse spécifique, donc plusieurs indices sont nécessaires pour saisir la nature multiforme de la sécheresse. Néanmoins, l'indice de précipitation standardisé (SPI) est recommandé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) pour la surveillance de la sécheresse, qui est calculée uniquement sur la base des données de précipitation à long terme sur différentes périodes. Les avantages du SPI permettent de requérir seulement les précipitations mensuelles afin de caractériser différents types de



sécheresse compte tenu des différents temps de réponse des différentes sources d'eau utilisables aux déficits de précipitations. Cependant, les informations sur les précipitations ne suffisent pas à caractériser la sécheresse. Dans la plupart des définitions, les conditions de sécheresse dépendent également de la demande de vapeur d'eau de l'atmosphère. Plus récemment, Vicente-Serrano et al. (2010) ont proposé un indice de sécheresse alternatif pour le SPI, appelé indice de précipitations et d'évapotranspirations standardisés (SPEI). Par rapport au SPI, il prend en compte non seulement l'apport de précipitations, mais également la demande d'évapotranspiration (Beguería et al, 2014; Vicente-Serrano et al., 2012). Cela rend l'indice plus informatif sur la détermination de la sécheresse.

Pour le calcul du SPEI, des observations de haute qualité et à long terme de précipitations et d'évapotranspirations sont nécessaires. Ces observations peuvent provenir des données de stations au sol ou de données maillées telles que des données satellitaires et de réanalyses. Par exemple, la base « SPEI » (Beguería et al, 2014) et le « Global Precipitation Climatology Center Drought Index (GPCC-DI) » (Ziese et al., 2014) fournissent tous les deux un ensemble de données SPEI à l'échelle mondiale. La base « SPEI » fournit une SPEI maillée avec une résolution spatiale de 50 km et est calculée à partir d'un ensemble de données de Séries temporelles (ST) de l'Unité de recherche climatique (CRU), qui sont produits sur la base des mesures de plus de 4000 stations météorologiques au sol dans le monde (Harris et al., 2014). L'ensemble des données SPEI fournies par GPCC-DI a une résolution spatiale de 1° et a été généré à partir des précipitations du GPCC (Becker et al., 2013; Schneider et al., 2016) et des données de température du Centre de prévision climatique (CPC) de l'Agence américaine d'Observation Océanique Atmosphérique (NOAA) (Fan and van den Dool, 2008). Ces deux ensembles de données ont été appliqués sur diverses études liées à la sécheresse à l'échelle mondiale et régionale par exemple Chen, H., Sun, (2015); Vicente-Serrano et al., (2013, 2016). Cependant, la résolution spatiale de ces ensembles de données SPEI globales est trop grande pour être appliquée à l'échelle du district ou du sous bassin (Vicente-Serrano et al., 2016). Ainsi, une quantification à l'échelle du sous bassin des conditions de sécheresse est particulièrement cruciale dans des régions telles que l'Afrique, dans lesquelles les données géospatiales et les indices de sécheresse peuvent être essentiels pour gérer les risques existants liés à la sécheresse (Vicente-Serrano et al., 2012) et où les mesures in situ sont rares (Anghileri et al., 2014; Masih et al., 2014). La disponibilité d'un ensemble données de sécheresse à haute résolution peut contribuer à une meilleure caractérisation du risque de sécheresse et de la vulnérabilité, et minimiser son impact sur l'eau et la sécurité alimentaire en soutenant les

décideurs politiques, les gestionnaires de l'eau et les parties prenantes. De manière pratique, avec les progrès de la technologie satellitaire, l'estimation des précipitations et de l'évapotranspiration à partir des ensembles de données de télédétection devient plus précise (Fisher et al., 2017). En particulier, les données de précipitation du « Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data » (CHIRPS) qui sont des données de précipitation à haute résolution issues de la combinaison de données satellitaires et de stations météorologiques (Funk et al., 2015) et les données haute résolution du modèle global d'évaporation des terres d'Amsterdam (GLEAM) (Miralles et al., 2011). La combinaison de ces deux sources de données fournit des ensembles de données de haute qualité et haute résolution pour la surveillance de la sécheresse en temps quasi réel. Dans ce travail, nous utilisons un ensemble de jeu de données SPEI à haute résolution spatiale de 5 km sur l'Afrique (SPEI-HR), développé à travers la combinaison des données CHIRPS et GLEAM (<http://dx.doi.org/10.5285/bbdfd09a04304158b366777eba0d2aeb>). Ce SPEI-HR peut être utile pour mettre en évidence les stratégies de gestion des secours en cas de sécheresse pour le continent. L'ensemble de données couvre la période de 1981 à 2016 et il est comparé de manière exhaustive avec l'humidité du sol, l'indice de végétation et les ensembles de données SPEI à résolution grossière.

### **2.2.2 Calcul du SPEI-HR sur l'Afrique**

Le SPEI proposé par Vicente-Serrano et al. (2010) a été utilisé pour une grande variété d'applications agricoles, écologiques et hydrométéorologiques. Il tient compte des impacts de la demande d'évapotranspiration et hérite de la simplicité et des caractéristiques multi-temporelles du SPI. La procédure de calcul SPEI comprend l'estimation d'un bilan hydrique (à savoir la différence entre la précipitation et l'évapotranspiration potentielle), l'agrégation du bilan hydrique climatique sur différentes échelles de temps (par exemple, 1, 3, 6, 12, 24, ou plusieurs mois) et un ajustement à une certaine distribution de paramètre. Comme suggéré par Beguería et al (2014) et Vicente-Serrano et al. (2016), la distribution de probabilité log-logistique est le meilleur calcul SPEI, à partir de laquelle la distribution de probabilité de la différence entre la précipitation et l'évapotranspiration potentielle peut être calculée. Les valeurs SPEI négatives et positives indiquent respectivement des conditions sèches et humides. Dans cette étude, l'ensemble des données CHIRPS et GLEAM ont été utilisés pour le calcul SPEI à haute résolution spatiale (5 km). A titre de comparaison, le SPEI de 50 km a également été calculé sur la base d'un ensemble de données CRU TS pour la même période

1981-2016. Il convient de noter que le SPEI sur les zones faiblement végétalisées et stériles a été masqué sur la base de spectroradiomètre d'imagerie à résolution modérée (MODIS) produit de couverture terrestre (MCD12Q1) (Friedl et al., 2010), parce que le SPEI n'est pas fiable sur ces zones (Beguería et al., 2010; Beguería et al., 2014 ;Zhao et al., 2017)

### **2.2.3 Critères d'évaluation**

La base de données SPEI (Beguería et al., 2014) a été calculée avec l'ensemble des données CRU TS, qui a été évalué et appliqué par de nombreuses études (par exemple Chen et al. 2013; Vicente-Serrano et al. 2013 ; ). Le SPEI nouvellement généré à haute résolution spatiale basé sur CHIRPS et GLEAM (SPEI-HR) est comparé temporellement et spatialement avec le SPEI calculé à partir des données CRU TS. En outre, le NDVI peut également servir d'indicateur de la sécheresse et de la santé des végétations, et d'évaluer la performance des indices de sécheresse (Aadhar & Mishra, 2017; Vicente-Serrano et al., 2013). De plus, l'humidité du sol dans la zone racinaire est une variable hydrologique idéale pour la surveillance de la sécheresse agricole (humidité du sol). L'humidité du sol de la zone racinaire (RSM) récemment libérée de GLEAM v3 offre une excellente occasion d'évaluer si l'humidité du sol est bien représentée par le SPEI. Pour faciliter la comparaison directe entre le SPEI et le NDVI ainsi que le RSM, le NDVI et le RSM sont standardisés en soustrayant leur moyenne correspondante et ont exprimé les anomalies résultantes en nombre d'écarts types. Cette standardisation a été appliquée par de nombreuses études pour évaluer les indices de sécheresse (Anderson et al., 2011; Mu et al., 2013; Zhao et al., 2017). La corrélation entre le SPEI et le NDVI standardisé et le RSM est quantifiée à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson (R). De plus, le SPEI haute résolution de GLEAM et CHIRPS est également rééchantillonné à la même taille de grille que le SPEI de CRUTS afin de quantifier leur corrélation et de déterminer si la valeur ajoutée du premier provient de sa précision accrue ou de sa résolution plus élevée. Le SPEI de résolution grossière de 50 km est appelé SPEI-CRU, tandis que le SPEI de haute résolution (5 km) utilisé dans la partie suivante est appelé SPEI-HR.

Les catégories de sécheresse en fonction des valeurs de SPEI sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 1).

**Tableau 1 :** Catégorisation du degré de sécheresse et d'humidité en fonction des indices standardisés de précipitations et d'évapotranspirations (Sané et al, 2020).

Valeurs SPEI	Séquences de sécheresse	Valeurs SPEI	Séquences humides
$SPEI < -2,00$	Extrêmement sèche	$2,00 < SPEI$	Extrêmement humide
$-1,99 < SPEI < -1,50$	Sévèrement sèche	$1,50 < SPEI < 1,99$	Sévèrement humide
$-1,49 < SPEI < -1,00$	Modérément sèche	$1,00 < SPEI < 1,49$	Modérément humide
$-0,99 < SPEI < 0,00$	Légèrement sèche	$0,00 < SPEI < 0,99$	Légèrement humide

## 2.3 Méthodes utilisées

### 2.3.1 Analyse en composante principale

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est l'une des méthodes d'analyse de données multivariées les plus utilisées. Elle permet d'explorer des jeux de données multidimensionnelles constituées de variables quantitatives. Cette méthode permet aussi de transformer des variables liées entre elles (dites "corrélées" en statistique) en nouvelles variables indépendantes les unes des autres (donc "non corrélées"). Ces nouvelles variables sont appelées "composantes principales", ou axes. L'étape ACP peut être considérée comme une étape réduisant le bruit de fond dans les données, ce qui peut conduire à une classification plus stable. Elle permet au praticien de diminuer l'information en un nombre de composantes plus limité que le nombre d'origine de variables. Il s'agit d'une approche à la fois géométrique (représentation des variables dans un nouvel espace géométrique selon des directions d'inertie maximale) et statistique (recherche d'axes indépendants expliquant au mieux la variabilité, la variance des données).

Voici une illustration toute simple pour mieux comprendre l'ACP (Image1).



Source : <https://lesatelierslumiere.com/art-shadow-sculptures-jeux-dombre>

**Image1** : L'ombre projetée sur le mur nous permet d'avoir une bonne idée de ce que représente la statue. Une seule dimension serait donc suffisante pour reconstruire une réplique plus ou moins fidèle de cette statue.

Supposons qu'on dispose d'un objet multidimensionnel (une statue par exemple) au centre d'une pièce. Sommes-nous en mesure de reconstituer une image plus ou moins précise de l'objet sans même regarder l'objet ? Absolument, il suffit d'effectuer une analyse en composantes principales : les variables originales seront les différentes formes de complexité représentées par l'objet et les composantes principales seront les ombres que l'objet projette sur les murs. Ainsi, en supposant qu'on peut observer les ombres, il sera possible de reconstituer l'objet au centre de la pièce en regardant les ombres projetées sur les murs de la pièce (Dusseault-bélangier, 2013).

Dans cette étude, pour pouvoir déterminer les composantes principales, une matrice de données a été considérée. Cette dernière est formée par deux colonnes qui correspondent aux dates et aux valeurs de SPEI et des lignes qui contiennent les caractéristiques ou variables de mesure (valeurs des SPEI par mois). Ces variables de mesure doivent représenter de la meilleure manière possible le phénomène étudié qui est la sécheresse. Pour se faire les données ont été traitées en calculant la moyenne interannuelle et l'anomalie. Ensuite des coefficients ont été

obtenus à partir de l'estimation des valeurs propres et des vecteurs propres afin de pouvoir déterminer le nombre de composantes principales (PC).

### 2.3.2 Test de Mann Kendall

Un test est un mécanisme qui permet de « trancher » entre deux hypothèses à partir des résultats d'une série de données. Le test de Mann-Kendall est un test statistique non-paramétrique (type de test généralement sans distributions statistiques et qui peut être utilisé même si les conditions de validité du test paramétrique ne sont pas vérifiées). Il est utilisé pour détecter la présence d'une tendance monotone au sein d'une série chronologique en absence de toute saisonnalité ou autres cycles. Ce test de tendance non paramétrique a d'abord été étudié par Mann (1945) puis repris par Kendall (1975). Il est par la suite amélioré par Hirsch et al., (1982, 1984), qui ont permis de prendre en compte une composante saisonnière à partir de la variabilité mensuelle des données de la qualité de l'eau. La méthode de Mann-Kendall a été suggérée par l'Organisation Météorologique Mondial (OMM) pour évaluer l'évolution des séries chronologiques de données environnementales (Yu et al 2002).

Le test de Mann-Kendall consiste à comparer chaque valeur de la série chronologique avec les autres valeurs restantes, toujours dans un ordre séquentiel. Le nombre de fois où les termes restants sont plus grands que ceux analysés est compté (Lettenmaier et al., 1994 ;Burn & Hag Elnur, 2002). La statistique de Mann-Kendall s'exprime comme suit :

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

Où  $n$  est la longueur de la série ;  $x_i$  et  $x_j$  sont les valeurs génériques de données séquentielles ; et la fonction  $\text{sign}(x_i - x_j)$  est défini par :

$$\text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1, & (x_i - x_j) > 0 \\ 0, & (x_i - x_j) = 0 \\ -1, & (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

La statistique  $S$  représente donc le nombre de différences positives moins le nombre de différences négatives trouvées dans les séries chronologiques analysées. Si l'hypothèse est nulle, il n'y a pas de tendance dans les données de corrélation entre les variables considérées et

le temps, chaque ordre de l'ensemble des données étant également probable. Dans cette hypothèse,  $S$  est approximativement une distribution normale avec la moyenne  $E(S)$  et la variance  $Var(S)$  est définie respectivement par les équations suivantes (Faye, 2017) :

$$E(S) = 0 \quad (3)$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

S'il y a des ex-aequo dans la série, la variance  $S$  est corrigée de la façon suivante :

$$Var(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (5)$$

Avec  $t_p$  le nombre de fois qu'un groupe de  $p$  observations identiques est rencontré dans une série chronologique et  $q$  le plus grand nombre d'observations incluses dans un groupe d'observations identiques.

Dès que l'échantillon contient une dizaine de données, la loi statistique de test  $Z$  ci-dessous peut être approchée par une gaussienne centrée-réduite.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{(Var(S))^{\frac{1}{2}}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{(Var(S))^{\frac{1}{2}}}, & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

La présence d'une tendance statistiquement significative est évaluée en étudiant la valeur de  $Z$ . L'hypothèse nulle ( $H_0$ ) indique l'absence d'une tendance et l'hypothèse alternative ( $H_a$ ) la présence d'une tendance dans la série. Une valeur de  $Z$  positive indique une tendance à la hausse dans le temps, tandis qu'une valeur de  $Z$  négative une tendance à la baisse. En cas de hausse ou de baisse de la tendance, l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) est rejetée.

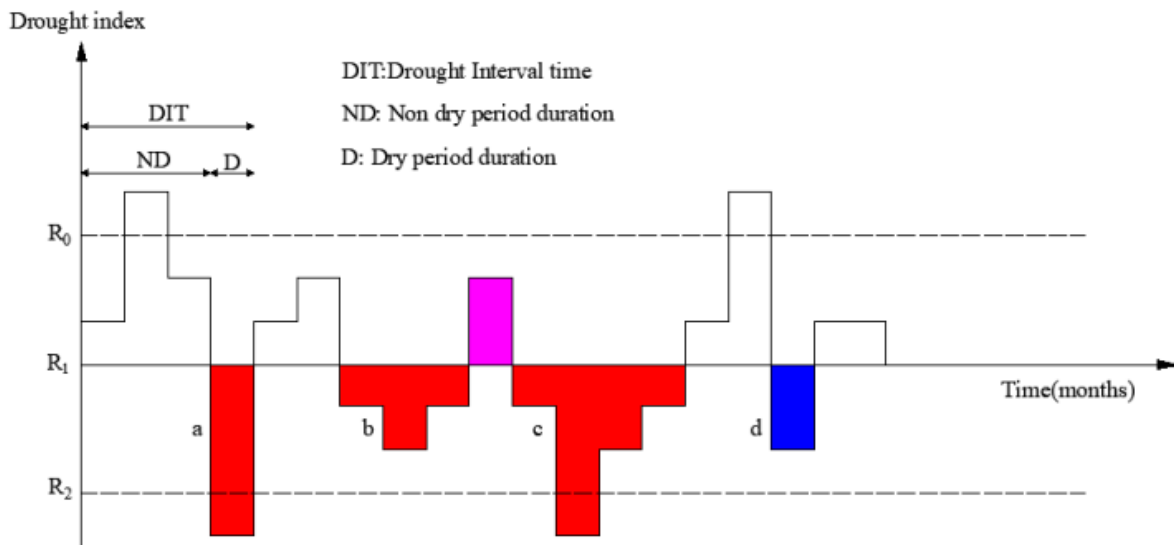
### **2.3.3 Caractéristiques de la sécheresse**

Les caractéristiques de la sécheresse s'expliquent principalement par différentes conditions de sécheresse, telles que la durée, la fréquence, la sévérité et l'intensité (Lee et al., 2017; Zhang et al 2015). Dans cette étude, la théorie des « runs » a été appliquée à l'aide des données de séries chronologiques de SPEI pour détecter la durée et la sévérité. La sécheresse est identifiée lorsque la valeur du SPEI descend en dessous de la valeur seuil (Schwalm et al., 2017 ; Xu et al., 2018). Les valeurs inférieures à -1,5 indiquent une sécheresse plus sévère à long terme par rapport aux conditions moyennes. Plus le SPEI est négatif, plus la sécheresse est sévère, et vice versa (Spinoni et al., 2014 ; Xu et al., 2018). Les valeurs SPEI négatives indiquent également le manque de pluie et une forte évapotranspiration.

Yevjevich (1967) a proposé la théorie des runs comme outil pour définir la sécheresse et étudier ses propriétés (Yevjevich, 1967). "Run" signifie une série du même symbole qui satisfait à certaines conditions. La longueur d'exécution est le nombre de symboles identiques dans une exécution. Cette théorie est basée sur la sélection d'un seuil approprié. C'est-à-dire, selon la relation entre la valeur de l'indice de sécheresse et le seuil, pour identifier le début, la poursuite ou la fin de la sécheresse. Dans cette étude, la durée et la sévérité de la sécheresse ont été séparées de la série d'indices de sécheresse en tant que facteurs caractéristiques de la sécheresse en utilisant la théorie des runs. La durée de la sécheresse est la durée entre le début à la fin de l'événement de sécheresse, et la sévérité de la sécheresse est la somme cumulée de la différence entre la valeur de l'indice de sécheresse et sa valeur seuil dans le processus de l'événement de sécheresse.



### 2.3.3.1 Exemple d'applications de la théorie des Runs



**Figure 4.** Définition des événements de sécheresse basée sur l'indice de sécheresse à l'aide de la théorie des runs (Wang et al., 2020)

Trois seuils d'indice de sécheresse différents (c'est-à-dire  $R_0$ ,  $R_1$  et  $R_2$ ) ont été fixés.  $R_0$  est principalement utilisé pour combiner les événements de sécheresse,  $R_1$  est principalement utilisé pour identifier les épisodes de sécheresse de faible sévérité,  $R_2$  est principalement utilisé pour identifier les épisodes de sécheresse à forte sévérité. Les valeurs de  $R_0$ ,  $R_1$  et  $R_2$  sont déterminées par la méthode des essais et erreurs. Lors de la détermination de la valeur seuil de l'indice de sécheresse, les résultats de l'identification des événements de sécheresse doivent être cohérents avec les événements de sécheresse réels enregistrés dans la documentation. Dans cette théorie, un mois est utilisé comme unité de temps pour l'identification des événements de sécheresse. La méthode est la suivante (Zhou et al., 2017) :

**(1) Identification préliminaire.** Lorsque la valeur de l'indice de sécheresse est inférieure à  $R_1$ , le mois est déterminé initialement comme la sécheresse (c'est-à-dire les événements **a**, **b**, **c** et **d** dans la figure 4).

**(2) Suppression des événements non liés à la sécheresse.** Pour les événements de sécheresse qui n'ont duré qu'un mois (par exemple, les événements **a** et **d**), si la valeur de l'indice de sécheresse est inférieure à  $R_2$  (par exemple, l'événement **a**), le mois sera considéré comme un événement de sécheresse, sinon, le mois ne sera pas considéré comme un événement de sécheresse (par exemple, l'événement de **d**) et sera supprimé.

**(3) Combinaison des événements de sécheresse.** Les deux épisodes de sécheresse seront combinés en un seul événement de sécheresse (par exemple, les événements de **b** et **c** sont combinés en un seul événement de sécheresse), lorsque l'intervalle de temps entre les deux événements de sécheresse adjacents n'est qu'une unité de temps et que la valeur de l'indice de sécheresse de la période d'intervalle est inférieure à  $R_0$ . Sinon, les deux épisodes de sécheresse seront considérés comme deux processus de sécheresse indépendants (Wang et al., 2020).

À partir de la figure, la durée de sécheresse combinée est :

$$\mathbf{D} = \mathbf{d}_b + \mathbf{d}_c + \mathbf{1} \quad (7)$$

Où  $\mathbf{D}$  est la durée combinée de la sécheresse ;  $\mathbf{d}_b$  et  $\mathbf{d}_c$  sont la durée de sécheresse des événements de  $b$  et  $c$ , respectivement.

La sévérité de la sécheresse combinée est :

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}_b + \mathbf{s}_c \quad (8)$$

Où  $\mathbf{S}$  est la sévérité combinée de la sécheresse ;  $\mathbf{s}_b$  et  $\mathbf{s}_c$  sont la sévérité de la sécheresse des événements de  $b$  et  $c$ , respectivement.

## Conclusion

La première partie de ce chapitre a été consacrée à la description des caractéristiques physiques et climatiques de la zone d'étude : sa situation géographique et sa climatologie ont été explicitées. Dans la deuxième partie, plusieurs ensembles de démarches raisonnées ont été évalués, ils permettront ainsi de mieux comprendre l'utilisation et le calcul de la donnée. Les méthodes suggérées ont été aussi brièvement expliquées. Les résultats de ces méthodes et leurs interprétations seront présentés dans le chapitre qui suit.

## Chapitre 3 : Résultats et discussions

---

Le présent chapitre présente l'application des différentes méthodes citées dans le chapitre précédent, illustre les différents résultats obtenus et met également en évidence les interprétations ainsi que les conclusions résultantes.

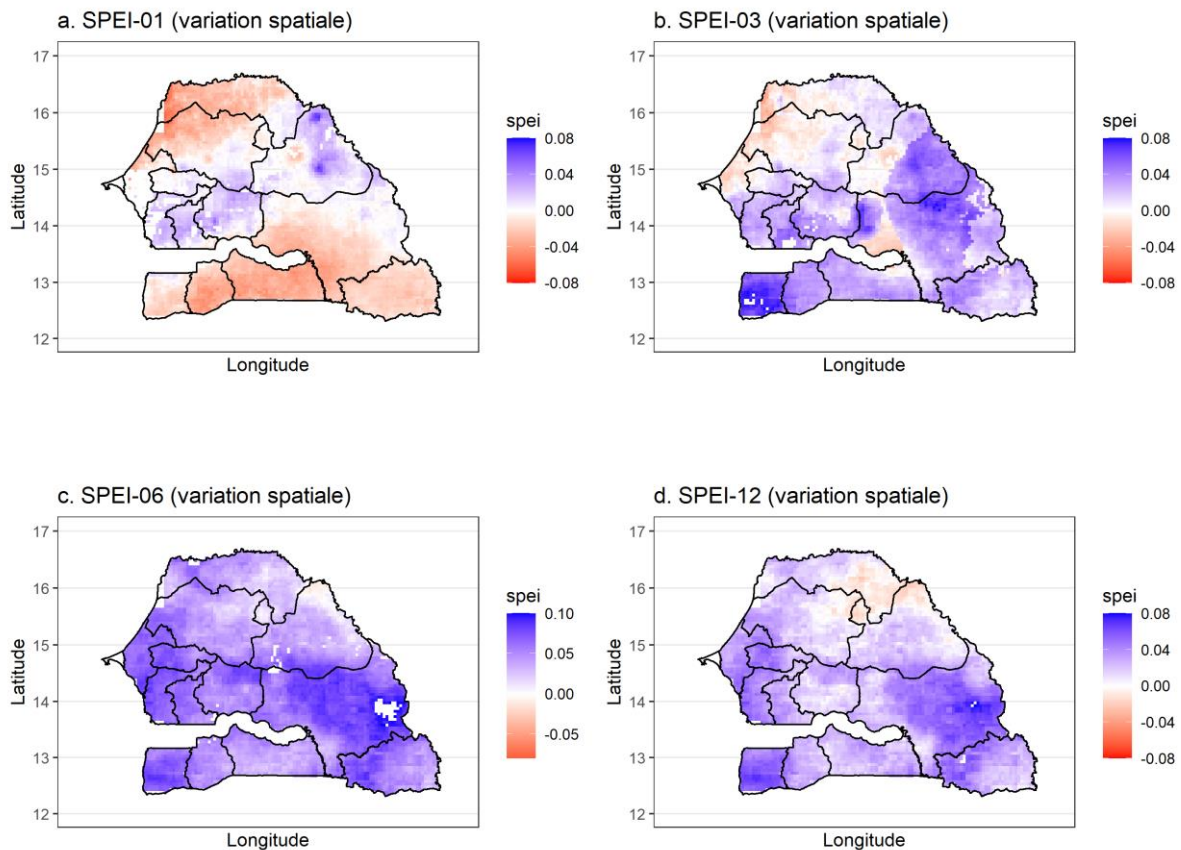
### 3.1 Variation spatiale moyenne des SPEI au Sénégal de 1983 à 2016

L'analyse des distributions spatiales des indices SPEI-HR permet d'évaluer la variation moyenne annuelle et saisonnière de la sécheresse sur la zone d'étude au cours de la période de 1983 à 2016. Ces analyses permettront de mieux comprendre la distribution spatiale des indices de sécheresse sur le Sénégal sur différentes échelles.

#### 3.1.1 Variation moyenne annuelle des SPEI

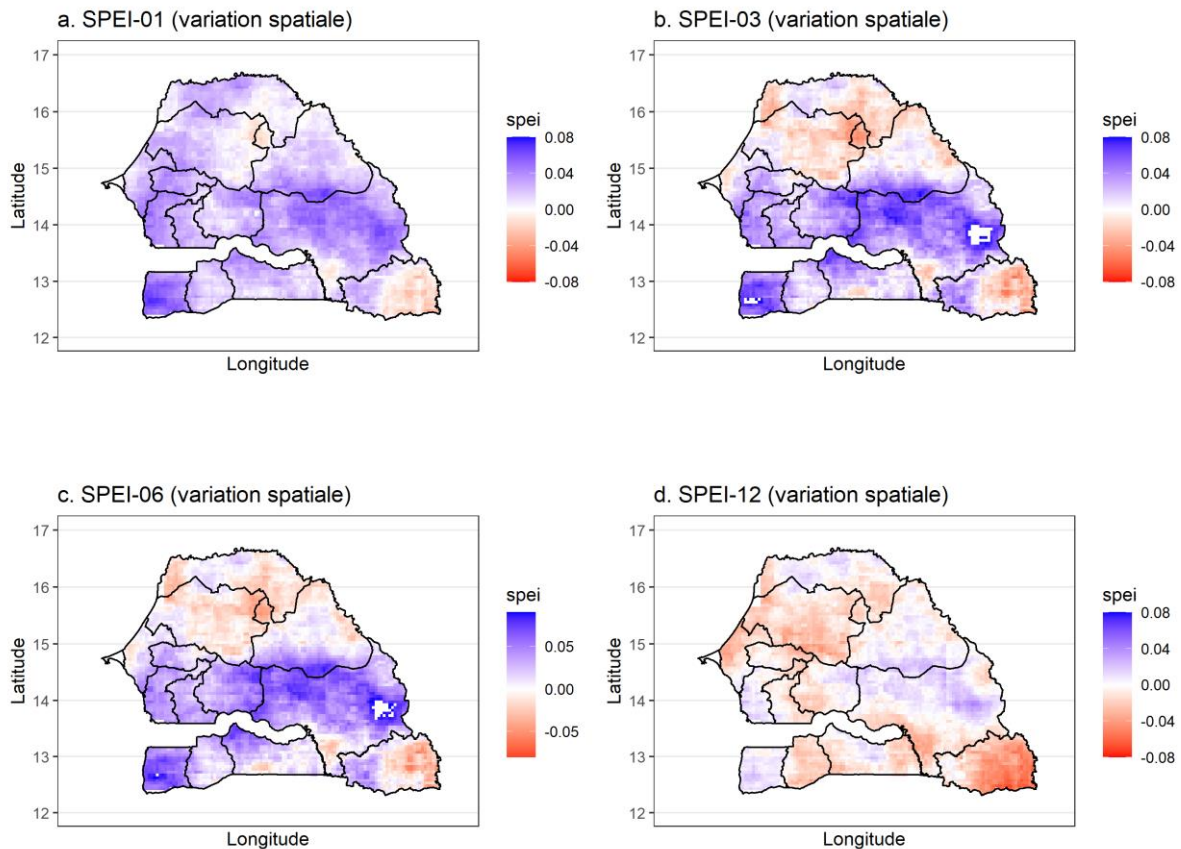
La distribution spatiale de l'indice SPEI-HR sur les différentes échelles est représentée sur la figure 5. Elle représente les variations moyennes de la sécheresse sur l'échelle annuelle sur la période d'observation (1983 à 2016) sur tout le Sénégal. La distribution spatiale des quatre indices de sécheresse (SPEI-HR) sur la zone d'étude fait ressortir des caractéristiques différentes. Ainsi l'analyse des distributions de SPEI-HR montre des zones humides (SPEI supérieur à 0), les zones sèches (SPEI inférieur à 0) et les zones à situation intermédiaire (SPEI égal à 0). Les zones humides sont considérées comme des zones où la pluviométrie est excédentaire et aussi nous avons une diminution de l'évapotranspiration. Par contre une zone sèche est synonyme de pluviométrie déficitaire et de forte évapotranspiration. L'indice de sécheresse conçu sur la base d'échelle de 1 mois c'est-à-dire le SPEI-HR-01 montre en moyenne une sécheresse au nord-ouest et sur la partie sud et sud-est du Sénégal. Par contre, sur la partie allant du centre vers l'est et le nord-est notamment sur la partie nord de Matam, nous observons en moyenne une distribution humide (Figure 5.a). Cette caractéristique humide est perçue davantage avec le SPEI-HR-03, qui montre des SPEI positifs du centre vers le sud, mais également à l'est et au sud-est. Cependant, la partie ouest et nord-ouest présente toujours en moyenne des signaux de sécheresse (Figure 5.b). L'analyse des distributions spatiales de SPEI-HR-06 et SPEI-HR-12 montrent des caractéristiques humides sur le Sénégal avec des zones d'humidité maximales sur la face ouest du Sénégal et sur l'est (Figure 5.c-d). Néanmoins, nous observons quand même des traces de zones sèches au nord de Matam et à l'est de Saint Louis

surtout avec le SPEI-HR-12. Nous remarquons également qu'il y a beaucoup de zone où la valeur de SPEI est nulle et donc des zones de précipitations normales. En somme, les indices décrivant une sécheresse météorologique et agricole sont respectivement le SPEI-HR-01 et le SPEI-HR-03. Quant à la sécheresse hydrologique, elle est caractérisée par le SPEI-HR-06 et le SPEI-HR-12.



**Figure 5.** Distribution spatiale de la variation moyenne de l'indice de précipitation et d'évapotranspiration standardisé (SPEI-01,03, 06 et 12) sur la période de 1983 à 2016 au Sénégal.

### 3.1.2 Variation saisonnière des SPEI



**Figure 6.** Distribution spatiale de la variation saisonnière (JJAS) de l'indice de précipitation et d'évapotranspiration standardisé (SPEI-01, 03, 06 et 12) sur la période de 1983 à 2016 au Sénégal.

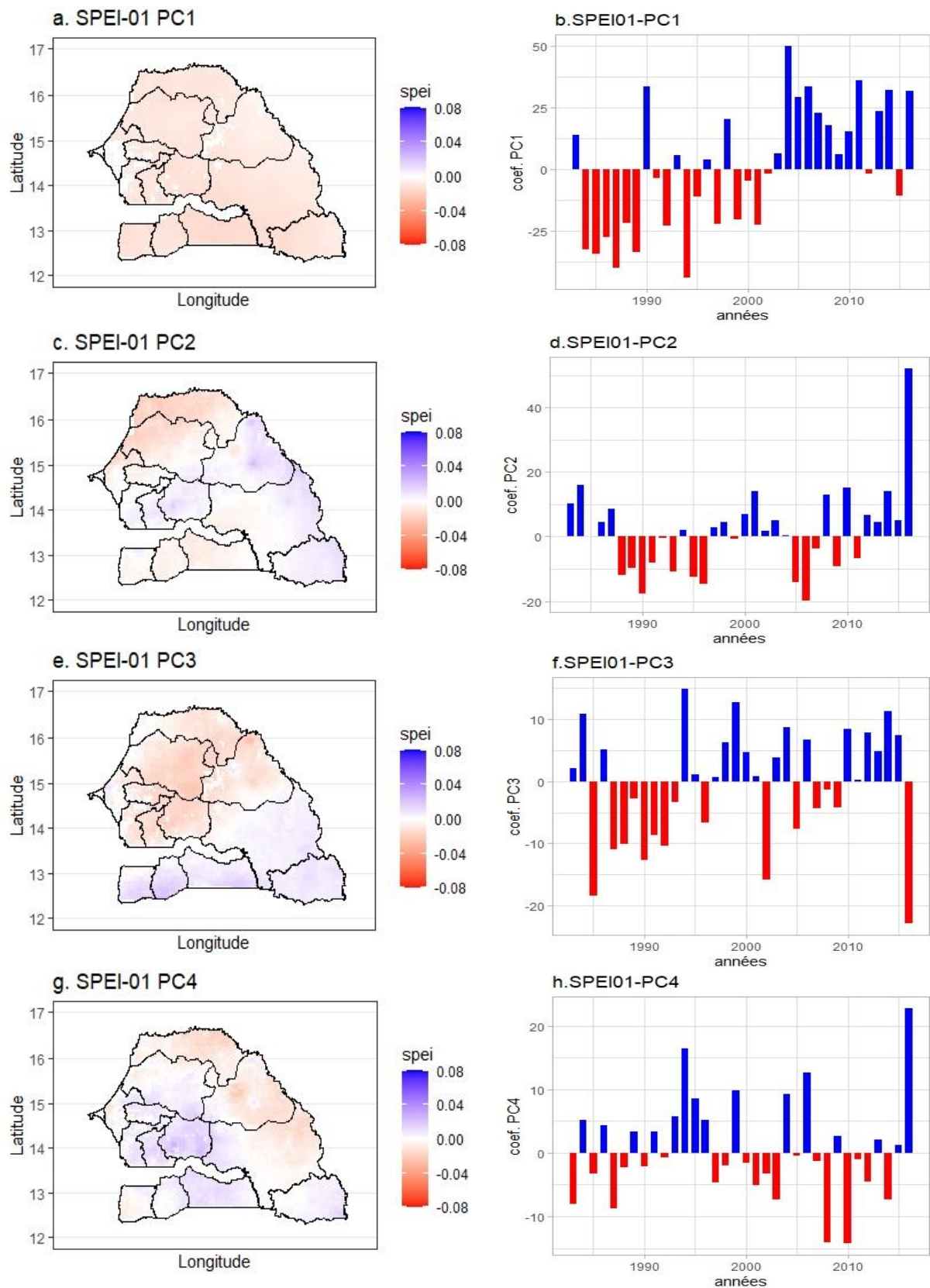
Les variations de la sécheresse d'une saison à l'autre sur la période de 1983-2016 sont analysées à partir de la moyenne saisonnière des indices de sécheresse sur différentes échelles (Figure 6). Des disparités spatiales de sécheresse sont observées. Sur la Figure 6, une alternance de zones sèches (SPEI inférieur à 0) et de zones humides (SPEI supérieur à 0) est observée. La distribution spatiale de SPEI-HR-01 présente une humidité sur l'ensemble du pays, excepté une petite partie à l'est de la région de Kédougou (Figure 6.a). Une situation contraire est observée avec la distribution de l'indice SPEI-HR-12 (Figure 6.d), nous observons des conditions de sécheresse sur presque l'ensemble du pays et beaucoup plus fortes dans certaines localités comme la région de Kédougou, Louga, Thiès, Sédhiou. Les indices SPEI-HR-03 et SPEI-HR-06 présentent des distributions similaires avec les mêmes zones de prédominance de la

sécheresse et de l'humidité (Figure 6.b-c). En effet, des séquences de sécheresse sont observées sur toute la partie Nord et des séquences humides au centre et sur une bonne partie du Sud du Sénégal. Cette humidité est plus marquée sur la basse Casamance, au nord de Tambacounda, et sur une partie de la région de Kaffrine.

Globalement, l'analyse des résultats basés sur les différents indices confirme que le Sénégal présente encore des zones qui souffrent de la sécheresse. Plusieurs facteurs complexes s'imbriquent et expliquent le caractère sec. Les variations de précipitation et de température ont des impacts directs sur l'occurrence de la sécheresse. En effet, la sécheresse se produit avec une précipitation inférieure à la normale persistante pendant plus de trois mois consécutifs (Liu et al., 2016). Les indices de sécheresse utilisés pour mesurer la quantité de précipitation et de température (sous forme de ETP) pour une période donnée s'écartent des moyennes historiques dans le temps et dans l'espace. Ainsi une rareté des pluies pendant la majeure partie de l'année, de fortes températures et d'évapotranspirations constituent des facteurs explicatifs de la sécheresse. Cette dernière se répercute aussi bien sur le bilan de l'écoulement superficiel et souterrain des eaux, que sur la nature et la densité du couvert végétal, intervenant ainsi de façon directe et indirecte dans la morphogénèse (Michel, 1973). Les variations spatiales de la sécheresse sont aussi probablement liées à l'augmentation de température signalée, avec le changement climatique (Haywood & Schulz, 2007). Cette augmentation de la température accentue l'évapotranspiration, ce qui rend le déficit en eau élevé. Ce réchauffement climatique conduirait probablement à l'intensification du cycle hydrologique (Yeh et Wu, 2018), entraînant des changements dans la disponibilité des ressources en eaux, la fréquence et l'intensité des sécheresses ainsi que l'amplification du réchauffement par le biais de la rétroaction de la vapeur d'eau (Huntington, 2006).

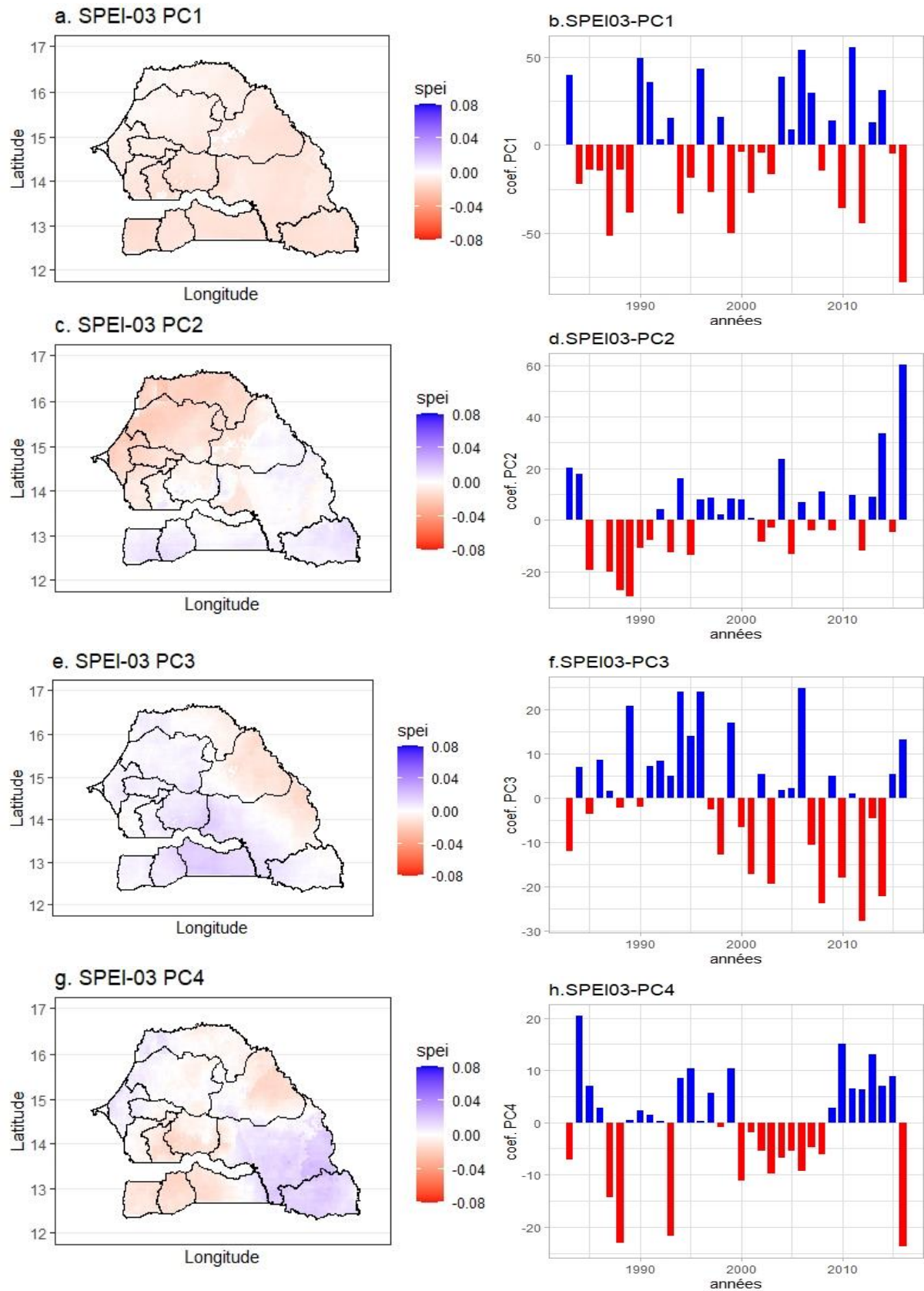
### **3.2 Structure spatio-temporelle des indices de sécheresse**

Pour mieux comprendre la structure distributionnelle de la sécheresse au Sénégal, une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée en utilisant les différents indices SPEI-HR à savoir SPEI-HR-01, SPEI-HR-03, SPEI-HR-06 et SPEI-HR-12



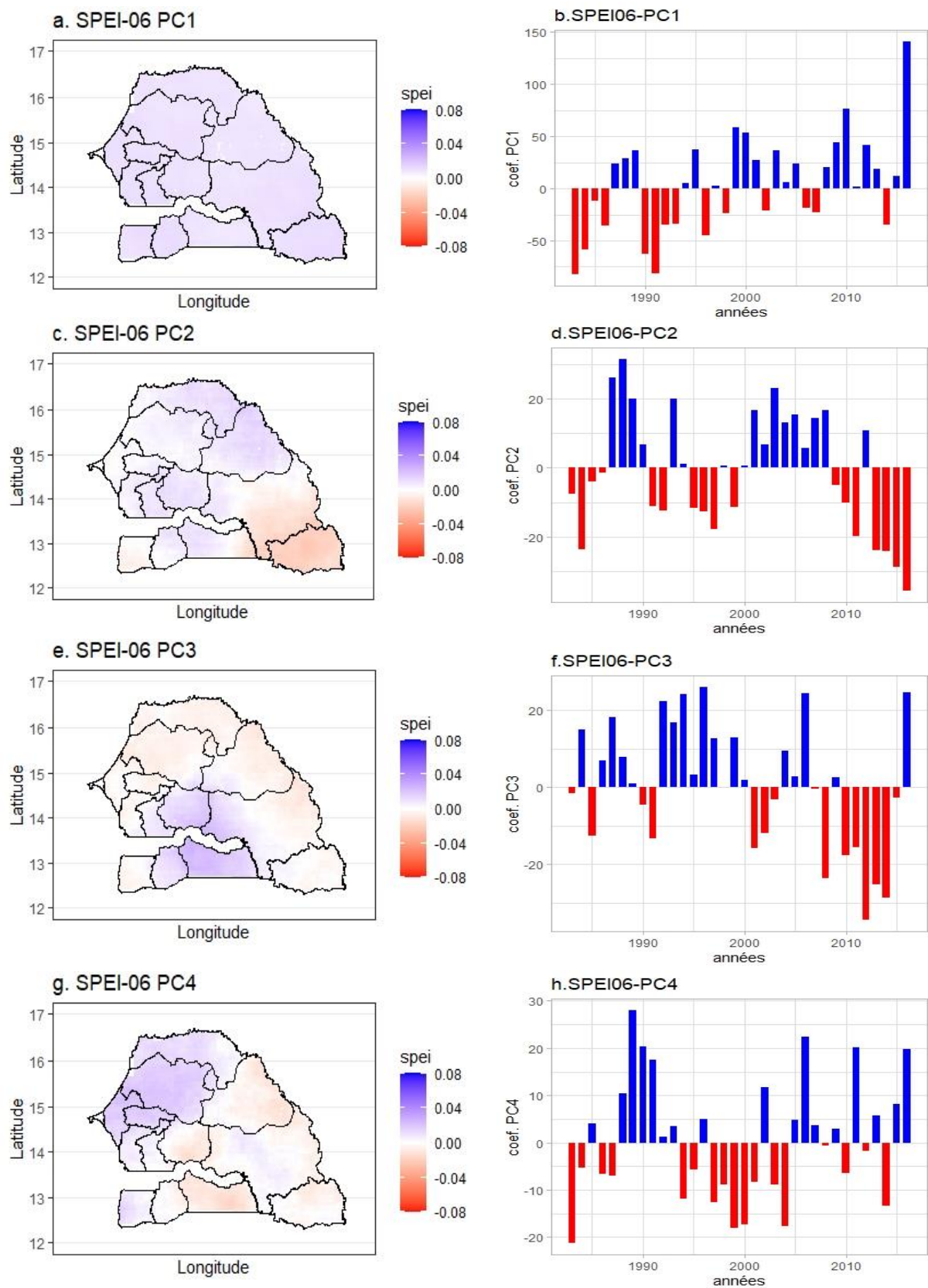
**Figure 7.** Variabilité spatio-temporelle des quatre composantes du SPEI-HR-01 au Sénégal sur la période de 1983 à 2016. Les représentations spatiales à gauche, tandis que celles des variations temporelles à droite.



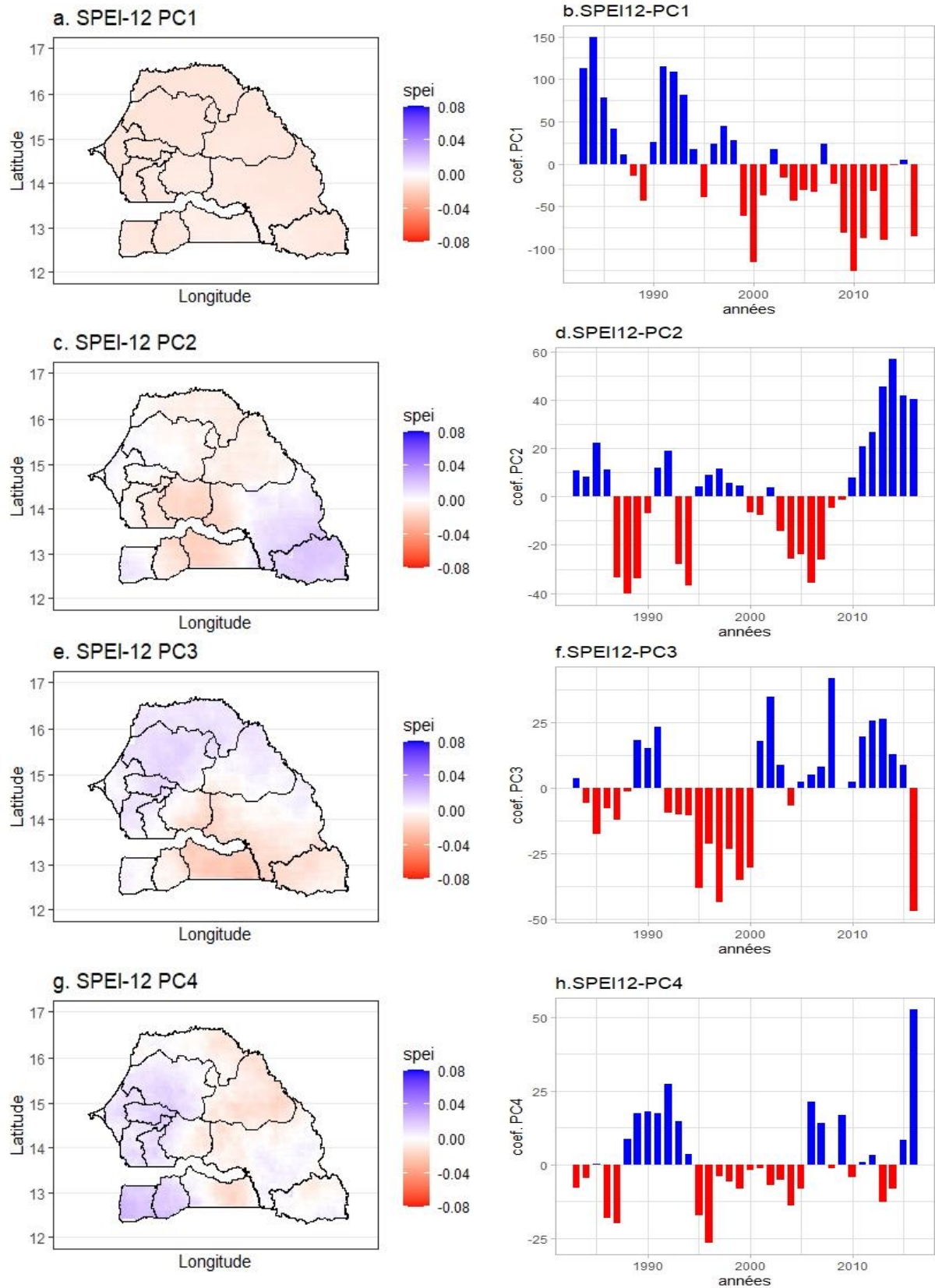


**Figure 8.** Variabilité spatio-temporelle des quatre composantes du SPEI-HR-03 au Sénégal sur la période de 1983 à 2016. Les représentations spatiales à gauche, tandis que celles des variations temporelles à droite.





**Figure 9.** Variabilité spatio-temporelle des quatre composantes du SPEI-HR-06 au Sénégal sur la période de 1983 à 2016. Les représentations spatiales à gauche, tandis que celles des variations temporelles à droite.



**Figure 10.** Variabilité spatio-temporelle des quatre composantes du SPEI-HR-12 au Sénégal sur la période de 1983 à 2016. Les représentations spatiales à gauche, tandis que celles des variations temporelles à droite.

Les quatre premières composantes principales de l'ACP sont représentées pour chaque SPEI-HR (Figures 7, 8,9, 10).

Les premières composantes principales de l'ACP des SPEI-HR avec des pas de temps de 01, 03 et 12 mois (Figure 7, 8 et 10) montrent chacun de très faibles valeurs positives de SPEI-HR correspondant à une légère sécheresse sur toute la zone d'étude. Par contre, la première composante de l'ACP appliquée sur l'indice SPEI-HR-06 (Figure 9) montre une caractéristique opposée avec une zone d'étude plutôt légèrement humide. Quant aux composantes temporelles associées à ces premiers facteurs, elles montrent des caractéristiques différentes. Pour le SPEI-HR-01, les décades allant de 1983 à 2005 sont caractérisées par une période globalement sèche suivie par une période humide jusqu'en 2015 (Figure 7.b). La composante temporelle PC1 de l'indice SPEI-HR-03 présente également une alternance de décades sèches et humides mais avec un nombre d'années réduit, cependant à partir de 2010, nous observons une alternance plutôt annuelle (Figure 8.b). Pour l'indice avec le pas de temps 06 mois les années excédentaires sont supérieures. Quant à la composante temporelle PC1 associée à l'indice SPEI-HR-12, la durée allant de 1999 à 2016 est caractérisée par une sécheresse.

Pour la deuxième composante principale de l'ACP de chaque SPEI-HR, les représentations spatiales des composantes présentent des valeurs négatives comme positives. Pour le SPEI-HR-01 (Figure 7.c), la partie Sud-Est du pays est humide ainsi que le centre (région de Kaolack) par contre le Nord et une partie du Sud (Casamance) sont sèches. La deuxième composante de l'ACP du SPEI-HR-03 (Figure 8.c) a prévu une sécheresse sur toute la partie Nord-Ouest du Sénégal, une légère humidité est notable dans la zone Sud. Pas de sécheresse ni d'humidité dans la zone Est du pays (Matam et Tambacounda) sur la période d'étude. En ce qui concerne le SPEI-HR-06 et le SPEI 12-HR, leurs composantes principales présentent des résultats complètement paradoxaux : c'est-à-dire les zones sèches (Kédougou, Tambacounda et la basse Casamance) présentées par le SPEI-HR-06 (figure 9.c) sont humides pour le SPEI-HR-12 (figure 10.c) et vice versa. Les composantes temporelles associées permettent la mise en évidence de l'identification des années sèches et des années humides obtenue à partir de SPEI-HR sur la période de 1983-2016. Pour le SPEI-HR-01, les intervalles de 1983 à 1986, de 1996 à 2004 et de 2012 à 2016 sont caractérisés par des périodes globalement humides (Figure 7.d). La composante temporelle PC2 de l'indice SPEI-HR-03 présente également une alternance de décades sèches et humides. Cependant à partir de 2002, une alternance d'année sèche et humide est observée (Figure 8.d). Les indices avec le pas de temps 06 et 12 mois présentent des

situations inverses : les périodes de 1983 à 1986, de 1995 à 1999, de 2009 à 2016 sont sèches pour le SPEI-HR-06 (Figure 9.d), pour le SPEI-HR-12 on voit le contraire (Figure 10.d).

La troisième et la quatrième composante principale de l'ACP permettent aussi de mettre en évidence la sécheresse mais avec un niveau de représentativité très faible. Ici l'ACP appliquée sur l'indice SPEI-HR-01 (Figure 7.e) présente une légère sécheresse sur toute la partie nord néanmoins la zone sud est légèrement humide. Pour la CP4 (Figure 7.g), c'est seulement une petite partie nord-est du Sénégal qui est un peu sèche par contre tout le reste du pays est humide. Ainsi pour la Figure 8.e, la CP3 a noté un déficit de pluviométrie sur la vallée du fleuve Sénégal et pour la CP4 (Figure 8.g), on voit que la région de Tambacounda est humide ainsi que la région de Kédougou et une grande partie du littoral. Le centre et une partie du sud (Sédhiou et Kolda) est aussi humide (Figure 9.e), cet excès de pluviométrie est aussi remarqué sur toute la partie nord-ouest par la CP4 (Figure 9.g). Pour la CP3 (Figure 10.e), hormis la région de Kolda, Kédougou, une partie de Tambacounda et de Kaffrine, tout le reste du territoire sénégalais est légèrement humide. Le même phénomène est observé avec la CP4 (Figure 10.g) sauf à Matam et à Saint-Louis qui sont des zones sèches. Cependant les profils temporels des SPEI-HR (Figure 7,8 9 et 10) caractérisent les valeurs positives (négatives) qui dénotent les années d'excédents (déficits). Ainsi, pour la CP3 de l'indice SPEI-HR-01 (figure 7.f), on note une sécheresse sur la période de 1985 jusqu'en 1993. Quant au CP4 (figure 7.h), une alternance d'années déficitaires et excédentaires est remarquée sauf que la durée allant de 1993 à 1996 est globalement humide. Même situation observée avec la CP3 de l'indice SPEI-HR-03 (figure 8.f), sauf qu'ici la période humide est de 1991 à 1996. La troisième composante de l'ACP appliquée sur l'indice SPEI-HR-06 (Figure 9.f) a noté que l'intervalle de 1984 à 2006 est humide excepté les années 1990, 1991, 2000, 2002 et 2003 qui sont déficitaires. La CP4 de l'indice SPEI-HR-06 (Figure 9.h) présente presque la même évolution que la première composante de l'ACP appliquée sur l'indice SPEI-HR-06. La CP3 et CP4 de l'indice SPEI-HR-12 (Figure 10) montrent aussi des caractéristiques différentes. Pour la CP3, l'intervalle allant de 1984 à 2000 est caractérisé par une période sèche suivie par une période humide jusqu'en 2015 (Figure 10.f). Pour la figure 10.h, les intervalles de 1983 à 1987 et de 1995 à 2005 sont globalement secs.

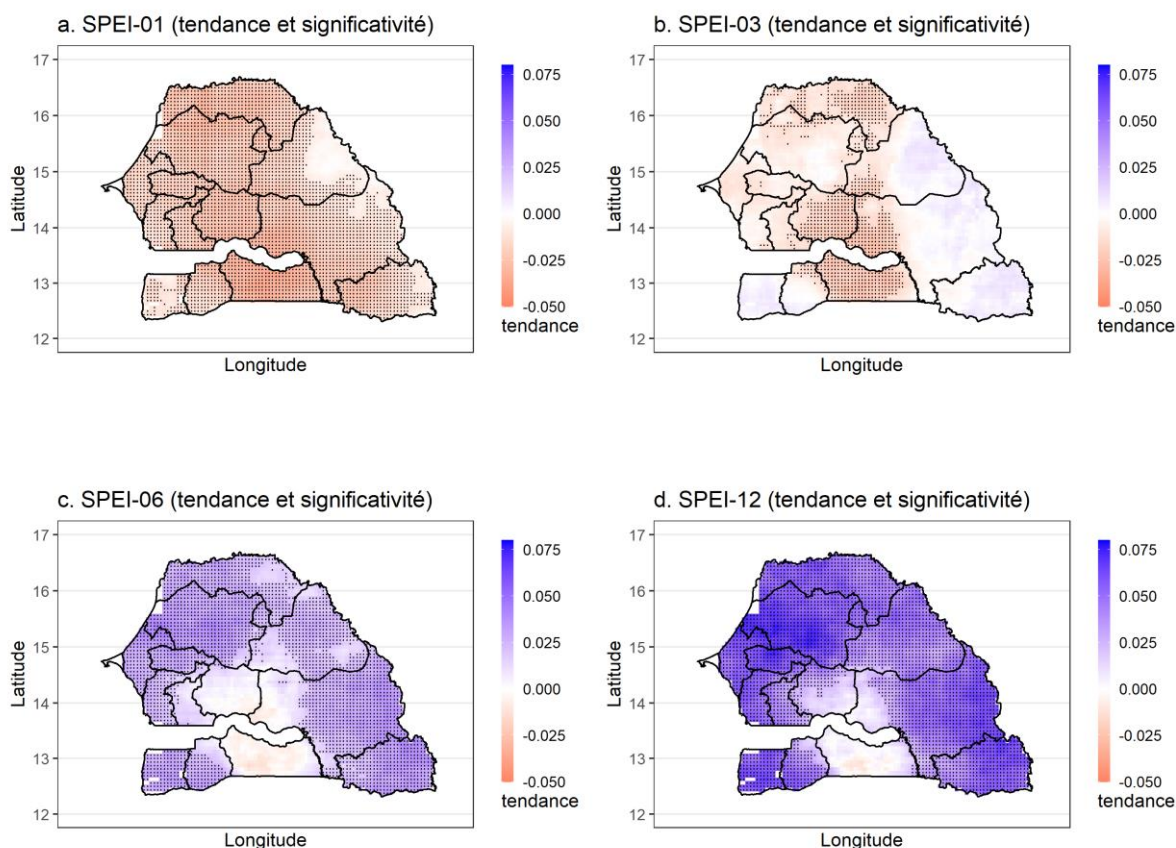
Les traitements réalisés avec les ACP mettent en évidence une fluctuation persistante d'années sèches et humides par rapport à la normale sur la période de 1983 à 2016 qui peut être due à une irrégularité de précipitations. Nonobstant, certaines études ont montré une diminution persistante des pluies, non seulement dans toute l'Afrique de l'Ouest, mais aussi au Sahel (Y.

L'hôte et al., 2002) en particulier au Sénégal. D'autres ont noté qu'au Sahel, la sécheresse n'était toujours pas terminée en 2002, malgré quelques années présentant une pluviométrie plus élevée après 1994 (G. M. et Y. L'hôte, 2004). Ainsi, plus la moyenne annuelle de la pluviométrie est faible, plus l'irrégularité des précipitations d'une année à l'autre est importante. Cette thèse peut être confirmée par l'alternance des années sèches et humides dans tout le pays sur la période de 1983 à 2016. L'étude des schémas spatio-temporels de la sécheresse peut aussi aider à mieux comprendre le mécanisme et les facteurs d'influence de l'occurrence de la sécheresse et son évolution (Zhou et al., 2017). En outre, au-delà des variations interannuelles des précipitations, il convient de tenir en compte le moment de leur déclenchement par exemple lorsque l'hivernage tarde à s'installer.

### **3.3 Les tendances de la sécheresse au Sénégal**

Les tendances sont des comportements de longue durée, à la hausse ou à la baisse, qui représentent l'évolution fondamentale d'un phénomène. Pour étudier la tendance générale de la sécheresse sur le Sénégal, la méthode de Mann Kendall a été appliquée sur l'indice SPEI-HR à différentes échelles de temps de 1983 à 2016. Les séries SPEI-HR moyennées annuellement et saisonnièrement ont été considérées dans cette étude.

Ainsi, la figure 11 représente la distribution spatiale des tendances annuelles de la sécheresse au Sénégal de 1983 à 2016 suivant les échelles de temps choisies (SPEI-HR-01, SPEI-HR 03, SPEI-HR-06, SPEI-HR-12).

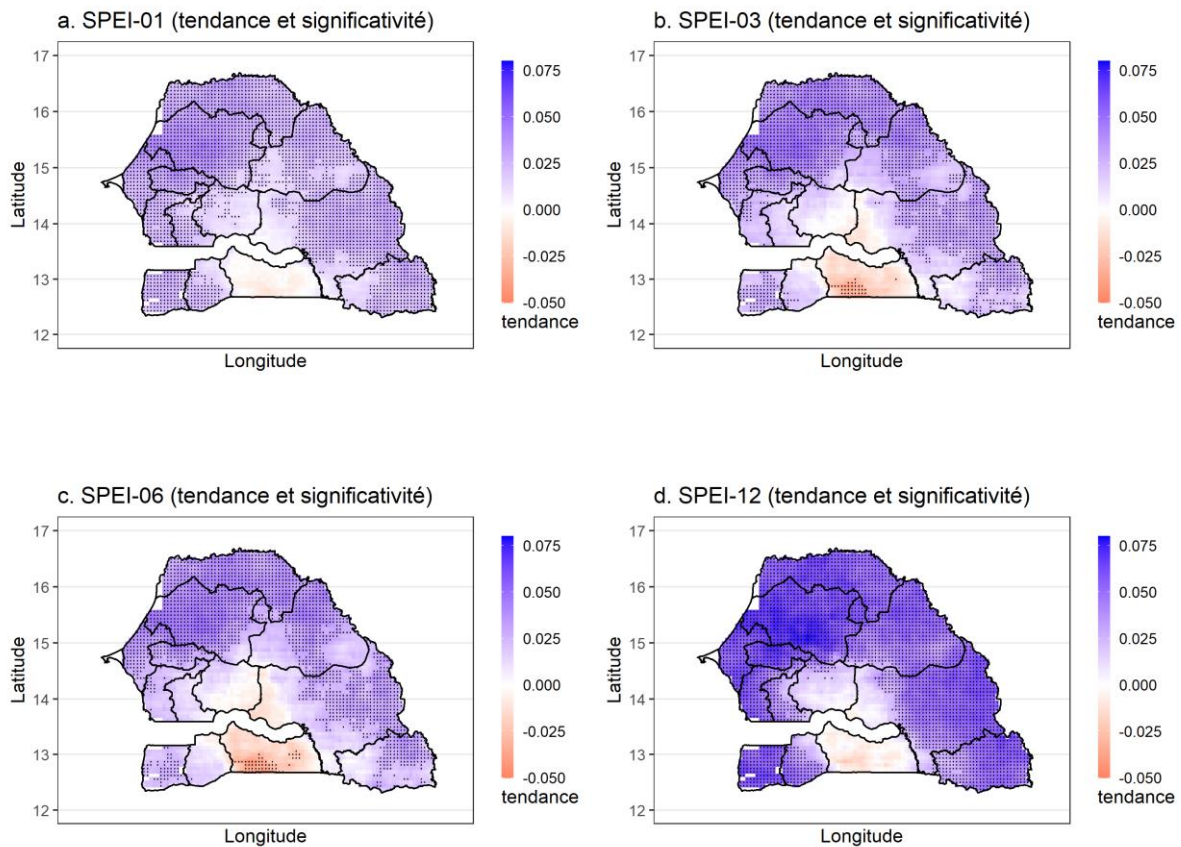


**Figure 11.** Distribution spatiale des tendances annuelles des SPEI au Sénégal sur la période 1983-2016. Les couleurs bleues ombrés et rouges ombrés indiquent respectivement les tendances significativement à la baisse et à la hausse.

Nous constatons que la distribution spatiale des tendances varie selon les pas de temps utilisés. L'analyse de la distribution de l'indice SPEI-HR-01 indique une tendance à la hausse de la sécheresse sur tout le Sénégal avec un niveau de significativité de 95%. Cette hausse est plus marquée sur la région de Kolda et est quasi constante au nord-est de la région de Matam. La sécheresse de type météorologique a tendance à augmenter sur le Sénégal (Figure 11.a). Dans le cas de l'indice sur 03 mois (SPEI-HR-03), une tendance à la baisse est observée dans la partie Est et sur la partie Sud du pays excepté la haute Casamance (région de Kolda) où la tendance est significative du point de vue statistique et positive. Pour le reste du pays, une tendance à la hausse est notée sans des niveaux de significativité sauf pour les régions de Kaffrine, Saint Louis, une petite partie de Tambacounda et Matam, où la tendance est statistiquement significative (figure 11.b). La distribution spatiale des tendances des indices de sécheresse donnée par le SPEI-HR-06 est similaire à celle donnée par le SPEI-HR-12 comme constatée sur les figures 11.c et d. Tous les deux indices présentent des tendances significativement



négatives, et donc une tendance à la diminution de la sécheresse à ces échelles. Cependant, cette tendance baissière est beaucoup plus apparente avec le SPEI-HR-12. Par contre, sur la région de Kolda, la tendance de sécheresse pour les deux indices d'échelle (06 mois et 12 mois) n'est pas significative et est même à la hausse. Son évolution est aussi presque constante dans certaines zones.



**Figure 12.** Distribution spatiale des tendances saisonnières (JJAS) des SPEI au Sénégal sur la période de 1983-2016. Les couleurs bleues ombrés et rouges ombrés indiquent respectivement les tendances significativement à la baisse et à la hausse.

Sur la figure 12, la distribution spatiale des tendances saisonnières de sécheresse sur la période de 1983 à 2016 pour les quatre indices SPEI-HR est représentée. Les valeurs moyennes saisonnières des quatre indices sont utilisées pour la représentation et l'analyse statistique de la tendance, afin de capturer la variabilité des tendances saisonnières des SPEI sur le territoire sénégalais. L'analyse montre que tous les indices SPEI-HR présentent des tendances saisonnières à la baisse sur tout le territoire sénégalais excepté une petite partie du centre et sur la haute Casamance (région de Kolda). Sur cette dernière, les tendances de sécheresse pour les

SPEI-HR-01 et SPEI-HR-12 sont presque nulles, alors que pour les indices sur 03 et 06 mois, les tendances sont à la hausse et statistiquement non significatives sauf sur de très petites zones de cette région. Cependant, nous notons que le degré de significativité de la tendance sur une région donnée varie selon l'échelle des indices utilisés. Ainsi, pour les indices de pas de temps de 03 mois et 06 mois, la tendance n'est pas statistiquement significative sur les régions de Fatick, Kaolack, Kaffrine et Sédhiou. Par contre dans d'autres régions, la tendance est significative du point de vue statistique soit sur toute la région, soit sur une partie et c'est le cas des régions de Matam, Tambacounda et Kédougou.

Globalement, nous constatons que plus le pas de temps est long, plus les conditions d'humidité s'intensifient sur la zone d'étude. La valeur absolue de la tendance augmente progressivement quand le SPEI est calculé avec une échelle de temps grande. Ceci est en conformité avec les analyses de Sané et al. (2020) qui ont montré que la valeur absolue de la tendance augmente lorsque le SPEI est calculé avec davantage de mois décalés. Il faut remarquer que la région de Kolda présente une tendance de sécheresse à la hausse quel que soit l'échelle de temps choisi.

La hausse des tendances de sécheresse météorologique et agricole à l'échelle annuelle peut être liée à la diminution des précipitations notée depuis les années 1970 ainsi que l'augmentation des températures. Ces tendances à la hausse se sont alors poursuivies jusqu'aux années 1990, 2000. Ceci est en phase avec les études de Faye (2017) qui ont montré qu'une sécheresse installée en 1970 est alors poursuivie jusqu'à la décennie 1990–1999. Néanmoins des tendances de sécheresse hydrologique à l'échelle annuelle comme saisonnière sont à la baisse. Ainsi, il est intéressant aussi de remarquer l'existence de cumuls pluviométriques, proches de la moyenne et parfois même excédentaires, induisant ainsi à une légère tendance de sécheresse à la baisse. Toutefois, ces conditions d'humidité qui convergent vers une légère amélioration au Sénégal ont été mises en évidence par certains auteurs. Bodian (2014) a identifié ce phénomène dans son étude sur la période 1999-2013. Déjà entre 1990 et 2000, Diaw et al., (2007) considèrent la situation pluviométrique de cette période comme « relativement normale ». Cependant, cette reprise timide de la pluviométrie ne permet pas réellement de confirmer la fin de la sécheresse car, nonobstant quelques zones humides. Dans l'ensemble, une tendance significative à la baisse de la sécheresse a été notée. Cette tendance de sécheresse (même si elle peut être statistiquement peu significative) peut avoir des effets importants sur les ressources en eau. Par exemple, les études de Faye (2017) prouvent que les trois stations de la Falémé ont montré un changement significatif des volumes d'eau écoulés dans le temps et donc des tendances d'écoulement significativement à la baisse. Cela est aussi en accord avec d'autres

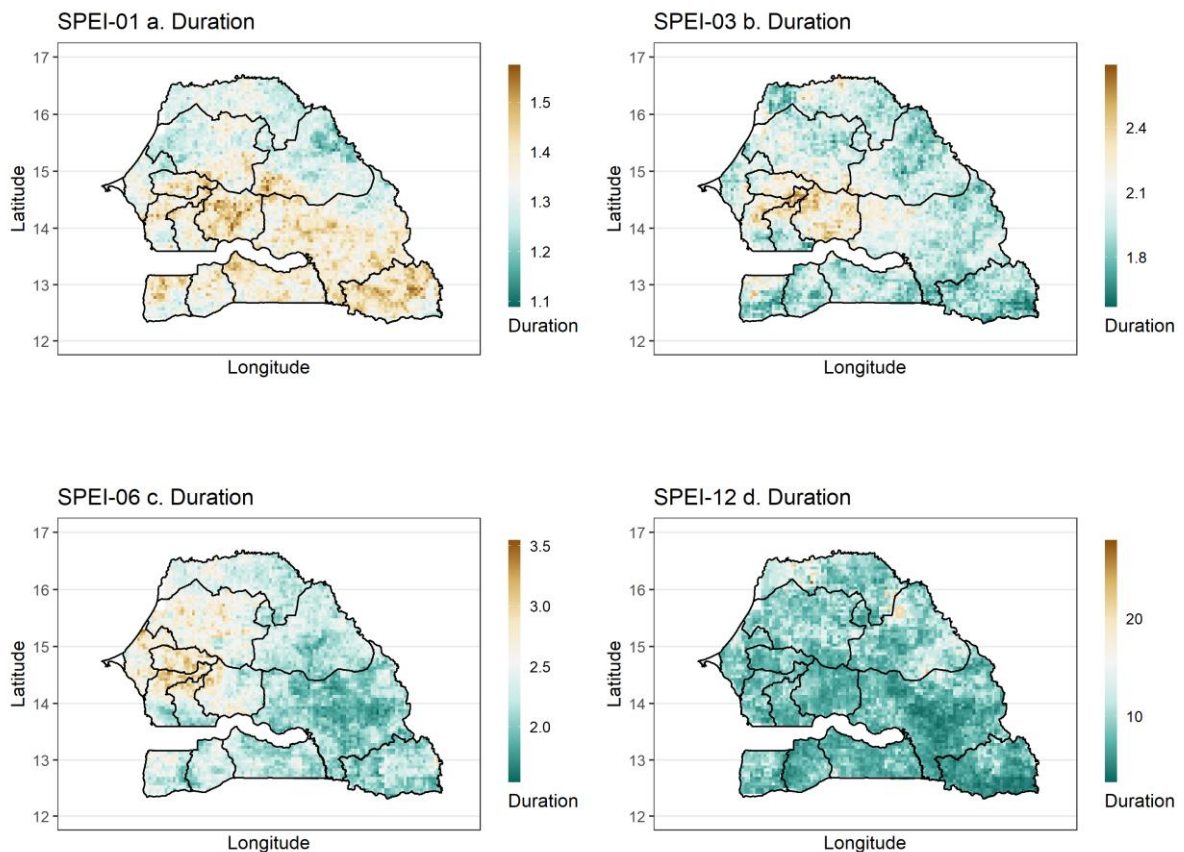


études faites sur la détection de tendances dans les eaux de ruissellement (Valimba et al. 2004 ; Chingombe et al., 2013).

### 3.4 Les caractéristiques de la sécheresse au Sénégal

La sécheresse qui a débuté en Afrique à la fin des années 1960 a encore persisté avec d'importantes caractéristiques variables suivant les différentes régions. Cette sécheresse est particulièrement prononcée en Afrique de l'Ouest, notamment dans la région soudano-sahélienne, en particulier le Sénégal. Parmi ces caractéristiques on peut distinguer la durée et la sévérité.

#### 3.4.1 Durée moyenne des sécheresses au Sénégal

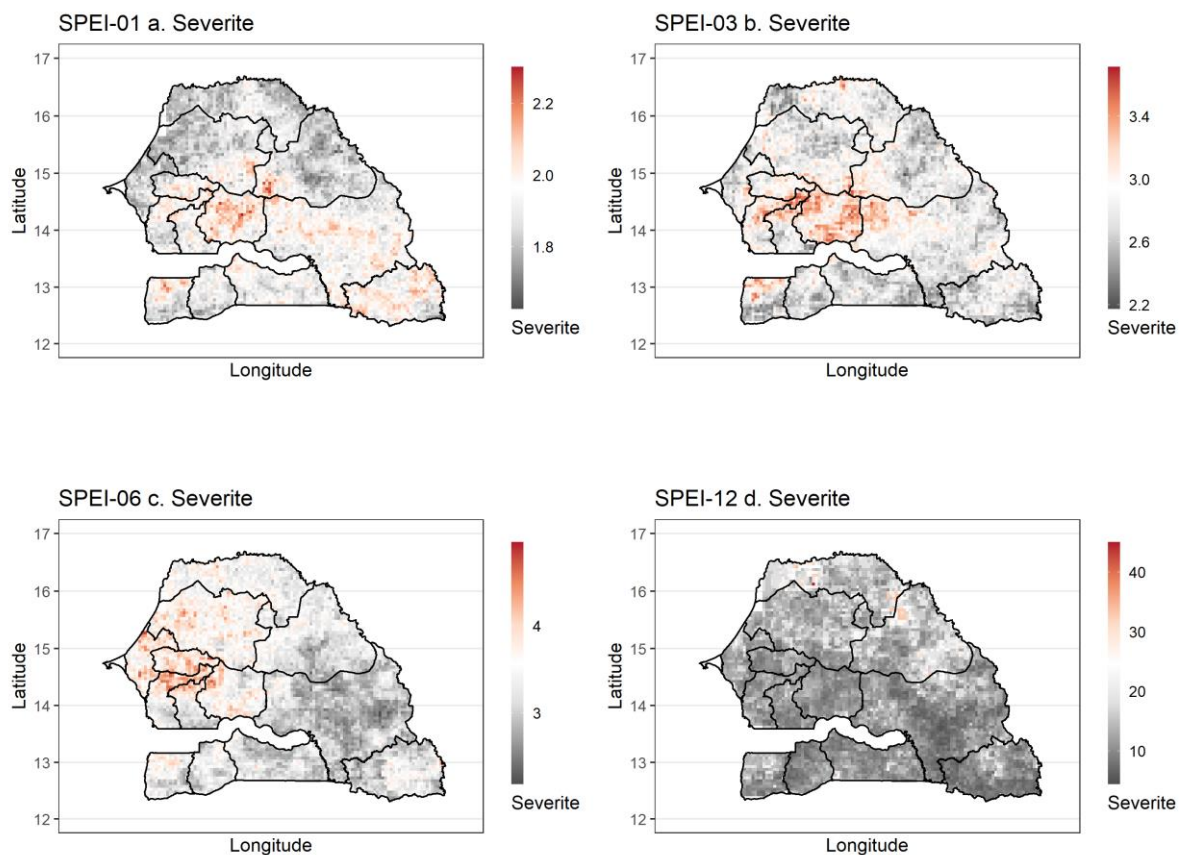


**Figure 13.** Variations spatiales de la durée de sécheresse au Sénégal entre 1983 et 2016.

La durée de la sécheresse est une caractéristique importante. La figure 13 montre la durée spatiale de la sécheresse à différentes échelles de temps sur le Sénégal entre 1983 et 2016. Dans l'ensemble, les régions du centre du Sénégal présentent des durées de sécheresse plus longues que les autres régions (SPEI-03 et 06). Cependant, nous constatons que l'indice de sécheresse

basé sur un pas de temps d'un mois (SPEI-HR-01) présente des durées de sécheresse supérieures à un mois et demi et sont maximales aussi bien qu'au centre du Sénégal mais également dans la partie sud et sud-est, où elles sont très marquées dans la région de Kédougou (Figure 13.a). Cette situation pose un défi pour l'agriculture, les écosystèmes et la société (Chen et Sun, 2015). Quant au SPEI-12 (Figure 13.d), les valeurs moyennes de durée sont très grandes (voir légende) contrairement aux trois premiers indices, mais cette durée est beaucoup plus importante sur le nord du pays. Ainsi, la distribution spatiale de la durée sur la période 1983 à 2016 nous a permis de détecter les zones sujettes à la sécheresse au Sénégal. Les valeurs maximales moyennes de durée de la sécheresse sur le territoire sénégalais sur la période de 1983 à 2016 sont 1.574, 2.689, 3.545 et 28.00 mois respectivement pour le SPEI-01, SPEI-03, SPEI-06 et SPEI-12. Autrement dit, les sécheresses identifiées sur la base de SPEI-06 notamment celles de SPEI-12 (sécheresses hydrologiques) persistent plus longtemps que celles basées sur le SPEI-1 et le SPEI-3 (sécheresses météorologique et agricole). Plus l'échelle de temps est grande, plus la durée spatiale de la sécheresse est importante, et la distribution de la sécheresse illustrée par le SPEI-12 a eu une tendance persistante beaucoup plus longue (Mpelasoka et al., 2018). Généralement, les grandes valeurs de durée de sécheresse indiquent l'existence d'événements de sécheresse persistants à court terme avec une durée plus longue, tandis que les faibles valeurs indiquent une occurrence de la fréquence intermittente d'épisodes de sécheresse de courte durée. Des sécheresses à court terme peuvent constituer de graves menaces pour l'agriculture, tandis que les sécheresses à long terme affectent le cycle hydrologique (Steinmann et al., 2015).

### 3.4.2 Sévérité moyenne des sécheresses au Sénégal



**Figure 14.** Variations spatiales de la sévérité de sécheresse au Sénégal entre 1983 et 2016.

La sévérité est la somme cumulée de la différence entre la valeur de l'indice de sécheresse et son seuil. La sévérité ne doit pas être confondue avec l'intensité, qui est généralement appelée la valeur SPEI la plus basse de l'événement de sécheresse (Spinoni et al., 2014). La figure 14 montre la distribution spatiale moyenne de la sévérité de la sécheresse sur la zone d'étude au cours de la période de 1983 à 2016. Une sécheresse légèrement sévère en moyenne a été constatée dans le centre du pays avec le SPEI-HR-03 et SPEI-HR-06 (Figure 14.b et 14.c) et dans certaines parties au nord également. Une sévérité avec de très faibles valeurs notée avec le SPEI-01 (Figure 14.a) dans le centre et le sud du Sénégal, contrairement à l'indice sur 12 mois (Figure 14.d) qui présente de grandes valeurs de sévérité (voir légende) pouvant ainsi signifié une sécheresse très sévère en moyenne dans toute la zone, et beaucoup plus visible au nord du pays. Les valeurs maximales de sévérité de la sécheresse au Sénégal sur la période d'étude considérée sont 2.300, 3.713, 4.957 et 45.013 sur la base du SPEI-HR-01, SPEI-HR-03, SPEI-HR-06 et SPEI-HR-12, respectivement. Ces résultats suggèrent qu'une augmentation

substantielle de la sévérité de sécheresse en fonction de l'échelle de temps. Les différences d'échelles de temps conduisent à des résultats spécifiques de sévérité de la sécheresse pour chaque échelle de temps. Cela indique que les pas de temps utilisés sont des paramètres importants mais aussi indispensables pour l'étude de la variation spatiale des types de sécheresse tels que celles hydrologiques, édaphiques et météorologiques. Par conséquent, les mesures d'adaptation et d'atténuation de la sécheresse peuvent dépendre des résultats de l'échelle de temps considéré, qui est plus élevé aux échelles saisonnières et interannuelles (Haile et al., 2019)

Dans cette étude, la sécheresse a été caractérisée par sa durée et sa sévérité spatiale. La prise en compte des différentes échelles de temps des indicateurs de sécheresse est cruciale pour comprendre l'évolution de la sécheresse (Haile et al., 2019). Les pas de temps des indices de précipitations et d'évapotranspirations normalisées sont pertinents pour expliquer la variation spatiale de la sécheresse. Les variations moyennes annuelles et saisonnières de la sécheresse basée sur les valeurs SPEI augmentent avec l'échelle de temps, ceci est en parfaite conformité avec les résultats de Steinemann et al., (2015). D'après l'analyse des échelles de temps des SPEI, la sécheresse est plus perceptible sur des échelles de temps de SPEI plus longues, ce qui est cohérent avec les conclusions de Potopová et al., (2018) et Vicente-Serrano et al., (2012). Cela indique que les indicateurs de sécheresse à échelle de temps plus longues (SPEI-06 et SPEI-12) montrent des sécheresses nettement plus sévères que les pas de temps plus courts (SPEI-01 et SPEI-03). La sécheresse météorologique peut être représentée par le SPEI-01 alors que celle agricole est caractérisée par le SPEI-03; les sécheresses hydrologiques quant à elles sont principalement représentées par le SPEI-06 et le SPEI-12 (Asong et al., 2018). Ces types de sécheresses ont des comportements de propagation qui vont de la sécheresse météorologique à agricole puis hydrologique (Van Loon, 2015). Des résultats similaires pourraient également être obtenus lorsqu'on utilise d'autres indices de sécheresse. De plus, les composantes caractérisant la sécheresse, telles que la durée, la fréquence et l'intensité, ont été largement utilisées dans la littérature (Spinoni et al., 2014). Ces études ont montré une tendance significative à l'assèchement et à l'augmentation des schémas de sécheresse.

En général, une longue durée de sécheresse sévère est répartie presque dans tout le pays. Ce dernier est caractérisé par des conditions climatiques arides et semi-arides avec des occurrences fréquentes de sécheresses sévères. Les zones restantes aussi sont également confrontées à des épisodes de sécheresse. Dans l'ensemble, la durée et la sévérité de la sécheresse sont constatées de manière significative au cours de la période d'étude au Sénégal.

## Conclusion

La variation moyenne saisonnière et annuelle des indices standardisés de précipitations et d'évapotranspirations indique que le nord est beaucoup plus touché par la sécheresse que le Sud. Ce déficit est beaucoup plus apparent saisonnièrement surtout avec les grandes échelles de temps. Les composantes temporelles associées aux analyses en composantes principales mettent en évidence l'identification d'une fluctuation de décades sèches et humides obtenue à partir des indices sur la période d'étude. Dans l'ensemble une légère sécheresse a été remarquée sur toute la zone par les variations spatiales associées aux ACP. Les tests de Mann Kendall effectués sur la sécheresse ont montré dans l'ensemble des tendances négatives qui sont statistiquement significatives. La baisse des tendances est d'autant plus importante quand le pas de temps utilisé est grand. Ces tendances à la baisse sont beaucoup plus notables avec les variations moyennes saisonnières (JJAS). La durée et la sévérité ont été aussi étudiées. Plus la durée est longue, plus la sécheresse est sévère. Une augmentation substantielle de la durée et de la sévérité de sécheresse en fonction de l'échelle de temps a été observée. De manière générale, la sécheresse est plus sévère au centre et au nord du Sénégal.

## Conclusion générale

---

Comprendre les distributions spatiales et temporelles des événements de sécheresse est très important pour la prise de décision. Détecter les variations historiques des occurrences de sécheresse annuelle et saisonnière est indispensable pour connaître son évolution qui permettra de mettre en œuvre des mesures d'atténuations d'adaptations de ce phénomène. En effet, l'étude des indices de sécheresse comme le SPEI à différentes échelles de temps est fondamentale pour mieux connaître l'évolution de ce phénomène extrême sur le Sénégal, une zone soumise à de fréquentes sécheresses.

Un rappel sur les connaissances générales sur les différentes notions de la sécheresse qui ne sont rien d'autres qu'un déficit de pluviométrie a été effectué. Étant aussi l'un des phénomènes météorologiques extrêmes qui perturbe la biodiversité, la sécheresse reste une menace majeure dans certaines zones du monde notamment les pays du sahel comme le Sénégal

Les variations spatiales moyennes saisonnières et annuelles des indices standardisés de précipitations et d'évapotranspirations ont montré que le sud est moins touché par la sécheresse. Une fluctuation de décades sèches et humides obtenue à partir des indices sur la période d'étude a été notée par les composantes temporelles associées aux analyses en composantes principales. Dans l'ensemble une légère sécheresse a été notée sur toute la zone par les variations spatiales de ces analyses. Les tests de Mann Kendall effectués sur la sécheresse ont montré dans l'ensemble des tendances négatives qui sont statistiquement significatives. La baisse des tendances est d'autant plus importante que le pas de temps utilisé est grand. Des tendances à la baisse sont notables durant toute l'année mais beaucoup plus importantes avec les variations moyennes saisonnières (JJAS). Certaines caractéristiques comme la durée et la sévérité ont été aussi étudiées à quatre échelles de temps (SPEI-01, SPEI-03, SPEI-06 et SPEI-12). Plus la durée est longue, plus la sécheresse est sévère. Une augmentation substantielle de la durée et de la sévérité de sécheresse en fonction du pas de temps a été observée. Ainsi l'étendue et l'ampleur de sécheresse tend à augmenter avec l'échelle de temps. Dans l'ensemble, le Sénégal est touché par la sécheresse mais beaucoup plus sévère au centre et au nord du pays.

Néanmoins certaines méthodes comme le test de Mann Kendall renferment des limites relatives à la puissance des tests statistiques car une tendance non significative peut ne pas prouver l'absence de tendance, mais illustrer simplement l'incapacité du test à la détecter (Bard et al. 2012).

Dans cette étude, nous avons utilisé le SPEI pour analyser l'évolution des indices de sécheresse sur le Sénégal car il s'agit d'un indice amélioré qui tient compte à la fois la précipitation et l'évapotranspiration et que sa caractéristique multi-temporelle a permis de détecter les différents types de sécheresse. D'autres indices de sécheresse largement utilisés comme l'indice de l'humidité des sols (SWI : Soil Wetness Index) et l'indice de sécheresse de Palmer (PDSI : Palmer Drought Severity Index), ne sont pas pris en compte dans notre étude. Cependant dans nos recherches ultérieures, des analyses complètes sur la performance de ces différents indices de sécheresse devraient être utilisées pour une surveillance plus précise de la sécheresse. Appliquer aussi ces approches utilisées sur une période historique et sur une période future serait vraiment nécessaire en utilisant des données issues des modèles climatiques pour une évaluation des risques de sécheresse, une prise de décision fiable et pour une amélioration des compétences de prévision de la sécheresse en tenant compte de divers scénarios climatiques liés au réchauffement climatique.

## Références bibliographiques

---

- Aadhar, S., & Mishra, V. (2017). Data Descriptor: High-resolution near real-time drought monitoring in South Asia. *Scientific Data*, 4, 1–14. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.145>
- Anderson, M. C., Hain, C., Wardlow, B., Pimstein, A., Mecikalski, J. R., & Kustas, W. P. (2011). Evaluation of drought indices based on Thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental United States. *Journal of Climate*, 24(8), 2025–2044. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3812.1>
- Anghileri, D., Li, C., Agaba, G., Kandel, M., Dash, J., Reeves, J., Lewis, L., & Sheffield, J. (2014). *Co-production and interdisciplinary research in the BRECCIA project : bringing together different expertise and actors for addressing water and food security challenges in sub-Saharan Africa*.
- Asong, Z. E., Wheeler, H. S., Bonsal, B., Razavi, S., & Kurkute, S. (2018). Historical drought patterns over Canada and their teleconnections with large-scale climate signals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(6), 3105–3124. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3105-2018>
- Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., & Ziese, M. (2013). A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901-present. *Earth System Science Data*, 5(1), 71–99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>
- Beguéría et al. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring, *International Journal of Climatology*, 34, 3001-3023. *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2988.1>
- Bodian, A. (2014). *Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal ( Afrique de l ' Ouest )*. 8.
- Chen, H., Sun, J. (2015). *Changes in drought characteristics over china using the standardized precipitation evapotranspiration index*. *J. Clim.* 28, 5430–5447. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00707.1>. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017007>



- Chingombe W Gutierrez JE Pedzisai E and Siziba E. (2013). A Study of Hydrological Trends and Variability of Upper Mazowe Catchment, Zimbabwe. *Journal of Sustainable Development in Africa*.
- CIHEAM juin. (2004). Impact du changement climatique sur l'agriculture. *Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes*. <http://unfccc.int/>, [http://www.emakane.net/accomaroc/sites/default/files/base\\_documentaire/Impacts%25250Ades%25250Achangements%25250Aclimatiques%25250Asur%25250Alâ€™agriculture%25250Aau%25250AMaroc%25250Aet%25250Aen%25250ATunisie%25250AprioritÃ©s%25](http://www.emakane.net/accomaroc/sites/default/files/base_documentaire/Impacts%25250Ahttp://www.emakane.net/accomaroc/sites/default/files/base_documentaire/Impacts%25250Ades%25250Achangements%25250Aclimatiques%25250Asur%25250Alâ€™agriculture%25250Aau%25250AMaroc%25250Aet%25250Aen%25250ATunisie%25250AprioritÃ©s%25)
- Deboukh et Becharaf. (2019). *Deboukh A. et Becharaf F., 2019. Etude de la sécheresse agricole dans le bassin de l'Algérois : Caractérisation et Occurrence, 14P.* [www.climateanalytics.org/publications](http://www.climateanalytics.org/publications).
- Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2005. (2006). *Pollution Atmosphérique, 190, 165.*
- Diaw, A. T., Sané, T., & Sagna, P. (2007). *Péjoration climatique et dégradation des formations forestières en Haute-Casamance. Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University, n° 42, p. 31-40.*
- Dusseault-bélangier, F. (2013). L'analyse en composantes principales comme outil biostatistique une routine pour étudier une structure de biomarqueur. Mémoire de master. Faculté des sciences université de Sherbrooke, Québec.
- Fan, Y., & van den Dool, H. (2008). A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present. *Journal of Geophysical Research Atmospheres, 113(1), 1–18.* <https://doi.org/10.1029/2007JD008470>
- Faye, C. (2017). Variabilité et tendances observées sur les débits moyens mensuels, saisonniers et annuels dans le bassin de la Falémé ( Sénégal ). *Hydrological Sciences Journal, 62(2), 259–269.* <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.990967>
- Fisher, J. B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M. F., Hook, S., Baldocchi, D., Townsend, P. A., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D. D., Perret, J., Lagouarde, J. P., Waliser, D., Purdy, A. J., French, A., Schimel, D., ... Wood, E. F. (2017). The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resources*

*Research*, 53(4), 2618–2626. <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>

- Funk, C., Harrison, L., Shukla, S., Pomposi, C., Galu, G., Korecha, D., Husak, G., Magadzire, T., Davenport, F., Hillbruner, C., Eilerts, G., Zaitchik, B., & Verdin, J. (2015). Examining the role of unusually warm Indo-Pacific sea-surface temperatures in recent African droughts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(February), 360–383. <https://doi.org/10.1002/qj.3266>
- Haile, G. G., Tang, Q., Leng, G., Wang, J., Cai, D., Sun, S., Baniya, B., Zhang, Q., Tang, Q., Leng, G., Jia, G., Wang, J., Cai, D., Sun, S., & Baniya, B. (2019). *Machine Translated by Google Revue Pré-épreuves Machine Translated by Google*.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3), 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Haywood, J., & Schulz, M. (2007). Causes of the reduction in uncertainty in the anthropogenic radiative forcing of climate between IPCC (2001) and IPCC (2007). *Geophysical Research Letters*, 34(20), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL030749>
- Hirsch, R. M., Slack, J. R., & Geological, U. S. (1984). Rill R •. *Water Resources*, 20(6), 727–732.
- Huntington T. G. (2006). *Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis*. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83–95.
- Kendall, K. (1975). Thin-film peeling-the elastic term. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 8(13), 1449–1452. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/8/13/005>
- Klocke, N. L., & Hergert, G. W. (1990). *G90-964 How Soil Holds Water*. <http://digitalcommons.unl.edu/extensionhist%5Cnhttp://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/725>
- Kouassi, A., Assamoi, P., Bigot, S., Diawara, A., Schayes, G., Yoroba, F., & Kouassi, B. (2010). Étude Du Climat Ouest-Africain À L ' Aide Du Modèle. *Climatologie*, 7, 39–55.
- L'HÔTE, G. M. et Y. (2004). - *Sahel : une sécheresse persistante et un environnement profondément modifié*. *La Météorologie*, vol. 44, n° 8, p. 2-3. <http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

- L'HÔTE, Y., MAHÉ, G., SOMÉ, B., & TRIBOULET, J. P. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), 563–572. <https://doi.org/10.1080/02626660209492960>
- Lajoie G., Houle D., et Blondlot A., (2016). Impacts de la sécheresse sur le secteur forestier québécois dans un climat variable et en évolution. Montréal, Québec.
- Layelmam, M. (2008). *Calcul des indicateurs de sécheresse à partir des images NOAA/AVHRR. LIFE05 TCY/TN/000150,6p. September 2008.* <https://doi.org/10.13140/2.1.4680.8966>
- Lee, S.-H., Yoo, S.-H., Choi, J.-Y., & Bae, S. (2017). *Assessment of the Impact of Climate Change on Drought Characteristics in the Hwanghae Plain, North Korea Using Time Series SPI and SPEI: 1981-2100.* <https://doi.org/10.3390/w9080579>
- Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., and Wallis, J. R. (1994). *Hydro-climatological trends in the continental United States, 1948–88. Journal of Climate*, 7, 586–607. [doi:10.1175/1520-0442\(1994\)0072.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)0072.0.CO;2). [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00514-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00514-5)
- Liu, Z., Wang, Y., Shao, M., Jia, X., Li, X. (2016). *Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China. J. Hydrol.* 534, 281–299. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.003>.
- Mann. (1945). Nonparametric Tests Against Trend Author ( s ): Henry B . Mann Published by : The Econometric Society Stable URL : <https://www.jstor.org/stable/1907187> REFERENCES Linked references are available on JSTOR for this article : You may need to log in to JSTOR. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <http://www.jstor.com/stable/1907187>
- Masih, I., Maskey, S., Mussá, F. E. F., & Trambauer, P. (2014). A review of droughts on the African continent: A geospatial and long-term perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3635–3649. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3635-2014>
- Michel. (1973). Carte géomorphologique de la vallée du Sénégal, Feuille de Matam. *Le Développement Rural En Questions : Paysages, Espaces Ruraux, Systèmes Agraires. Maghreb-Afrique Noire-Mélanésie*, 89–109.
- Michele, B. (1996). By. *Groupe d'Agrométéorologie*, 09, 09.

- Miralles, D. G., Holmes, T. R. H., De Jeu, R. A. M., Gash, J. H., Meesters, A. G. C. A., & Dolman, A. J. (2011). Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 453–469. <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>
- Mpelasoka, F., Awange, J. L., & Zerihun, A. (2018). Influence of coupled ocean-atmosphere phenomena on the Greater Horn of Africa droughts and their implications. *Science of the Total Environment*, 610–611, 691–702. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.109>
- Mu, Q., Zhao, M., Kimball, J. S., McDowell, N. G., & Running, S. W. (2013). A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(1), 83–98. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00213.1>
- Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1–4), 69–88. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.012>
- Ouranos. (2016). *consortium de recherche sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada 5 Direction de la gestion des forêts Capitale-Nationale-Chaudière-Appalaches, MFFP 6 Dire*. <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportSecheresseForet.pdf>
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological Drought. In *U.S. Weather Bureau, Res. Pap. No. 45* (p. 58). <https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf>
- Panu, U. S., & Sharma, T. C. (2002). Défis de la recherche sur les sécheresses: Quelques perspectives et directions futures. *Hydrological Sciences Journal*, 47, S19–S30. <https://doi.org/10.1080/02626660209493019>
- Pascal, S. M. et R. (2000). *Atlas du Sénégal, édition Jeune Afrique*.
- Potopová, V., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Farda, A., Türkott, L., Soukup, J. (2018). *Projected changes in the evolution of drought on various timescales over the Czech Republic according to Euro-CORDEX models. Int. J. Climatol.* 38, e939–e954. <https://doi.org/10.1002/joc.5421>. <https://doi.org/10.3390/w12113214>

- Rind, D., Goldberg, R., Hansen, J., Rosenzweig, C., & Ruedy, R. (1990). Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought. *Journal of Geophysical Research*, 95(D7). <https://doi.org/10.1029/jd095id07p09983>
- Roquet, D. (2008). *Partir pour mieux durer : la migration comme réponse à la sécheresse au Sénégal ?*
- Sané et al. (2020). Utilisation de l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) de 1950 à 2018 pour caractériser la tendance de la sécheresse sur la BASSE CASAMANCE. *Revue Espace Géographique et Societe Marocaine*, 4(32), 107–133.
- Schneider, U., Ziese, M., Meyer-Christoffer, A., Finger, P., Rustemeier, E., & Becker, A. (2016). The new portfolio of global precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre suitable to assess and quantify the global water cycle and resources. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 374, 29–34. <https://doi.org/10.5194/piahs-374-29-2016>
- Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., & Vogt, J. (2014). World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2792–2804. <https://doi.org/10.1002/joc.3875>
- Steinemann, A., Iacobellis, S.F., Cayan, D. R. (2015). Developing and Evaluating Drought 39 Indicators for Decision-Making. *J. Hydrometeorol.* 16, 1793–1803. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-14-0234.1>. *Weather, Climate, and Society*. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-18-0042.1>
- Valimba, P., Mkhanda, S. H., Servat, E., & Hughes, D. (2004). Rainfall variability in southern Africa, its influences on stream-flow variations and its relationships with climatic variations. Thesis (PhD), Rhodes University, Grahamstown. South Africa. *Climatic and Anthropogenic Impacts on the Variability of Water Resources*.
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2(4), 359–392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., & Sanchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1–27. <https://doi.org/10.1175/2012EI000434.1>

- Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., & Sanchez-Lorenzo, A. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110>
- Vicente-Serrano, S. M., Tomas-Burguera, M., Beguería, S., Reig, F., Latorre, B., Peña-Gallardo, M., Luna, M. Y., Morata, A., & González-Hidalgo, J. C. (2016). A high resolution dataset of drought indices for Spain. *Data*. <https://doi.org/10.3390/data2030022>
- Wang, L., Zhang, X., Wang, S., Salahou, M. K., & Fang, Y. (2020). Analysis and application of drought characteristics based on theory of runs and copulas in Yunnan, southwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(13), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134654>
- Wilhelmi, O. V., Hubbard, K. G., & Wilhite, D. A. (2002). Spatial representation of agroclimatology in a study of agricultural drought. *International Journal of Climatology*, *22*(11), 1399–1414. <https://doi.org/10.1002/joc.796>
- Yeh, P. J. F., & Wu, C. (2018). Recent Acceleration of the Terrestrial Hydrologic Cycle in the U.S. Midwest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *123*(6), 2993–3008. <https://doi.org/10.1002/2017JD027706>
- Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Journal of Hydrology*, *7*(3), 353. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(69\)90110-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(69)90110-3)
- Yu, P.-S., Yang, T.-C., and Wu, C.-K. (2002). . *Impact of climate change on water resources in southern Taiwan*. *Journal of Hydrology*, *260*, 161– 175. [doi:10.1016/S0022-1694\(01\)00614-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00614-X).
- Zhang, Q., Qi, T., Singh, V.P., Chen, Y.D., Xiao, M. (2015). *Regional Frequency Analysis of Droughts in China: A Multivariate Perspective*. *Water Resour. Manag.* *29*, 1767– 1787. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0910-x>.
- Zhao, M., Geruo, A., Velicogna, I., & Kimball, J. S. (2017). A global gridded dataset of GRACE drought severity index for 2002-14: Comparison with PDSI and SPEI and a case study of the Australia millennium drought. *Journal of Hydrometeorology*, *18*(8), 2117–2129. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0182.1>

- Zhou, L., Wu, J., Mo, X., Zhou, H., Diao, C., Wang, Q., Chen, Y., & Zhang, F. (2017). Quantitative and detailed spatiotemporal patterns of drought in China during 2001–2013. *Science of The Total Environment*, 589, 136–145. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.02.202>
- Ziese, M., Schneider, U., Meyer-Christoffer, A., Schamm, K., Vido, J., Finger, P., Bissolli, P., Pietzsch, S., & Becker, A. (2014). The GPCP Drought Index - A new, combined and gridded global drought index. *Earth System Science Data*, 6(2), 285–295. <https://doi.org/10.5194/essd-6-285-2014>

# Webographie

---

<https://www.cieau.com/connaitre-leau/secheresse-comment-agir/> (03 Novembre 2021)

<https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9n%C3%A9gal> (07 Novembre 2021)

<https://www.bouelmogdad.com/geographie/> (08 Novembre 2021)

<https://lesatelierslumiere.com/art-shadow-sculptures-jeux-dombre/> (23 Novembre 2021 )

<https://www.peuplesdumonde.voyagesaventures.com/lageographie/g%C3%A9ographie-de-l-afrique/afrique-de-l-ouest/item/567-les-r%C3%A9gions-ethno-climatique-de-l-afrique-de-l-ouest.html> (30 juillet 2022)