

Revue de géographie du Laboratoire Leïd

Dynamiques des territoires et développement

N° 21
Juillet 2019



ISSN 0851-2515

Université Gaston Berger - Sénégal



SOMMAIRE

Impact de l'orpaillage sur l'élevage bovin dans l'est de la préfecture de Tchaoudjo au Togo	10
<i>Abdourazakou ALASSANE</i>	
Les services financiers numériques : facteurs de promotion urbaine dans la commune de la Médina (Dakar)	29
<i>Ibrahima NDIAYE, Alphousseyni NDONKY et Ngoné FALL</i>	
Contamination des eaux et de la bioaccumulation du plomb et du cadmium chez le sarothérodon mélanothéron et le chrysichthys nigrodigitatus dans le Delta de l'Oueme	44
<i>Nathanaël AHOUANDJINO, Aser Zinsou Simon HONVO, Parfait Cossi Alexis AHOHOUNDO et Coovi Aimé Bernadin TOHOZIN</i>	
Schéma directeur d'aménagement communal (sdac) de la commune de Grand Popo : moyen d'atténuation ou d'amplification des risques d'inondations ?	61
<i>Fernando Joseph G. GBYETIN, Ibouaïma YABI et Fulgence AFOUDA</i>	
Infrastructures de base et inégalités spatiales dans l'arrondissement d'Ifangni au Bénin	78
<i>Aser Zinsou Simon HONVO, Parfait Cossi Alexis AHOHOUNDO et Coovi Aimé B. TOHOZIN</i>	
Étalement urbain, sous-équipement et vulnérabilités de Togblekope dans la périphérie nord de la ville de Lomé (Togo)	92
<i>Goumpougini DJERGOU, Iléri DANDONOUGBO et Follygan HETCHELI</i>	
Quantification de la sécheresse météorologique par des indices standardisés de précipitations dans la vallée du fleuve Sénégal, de 1980 à 2017.....	108
<i>Cheikh FAYE, Djibrirou Daouda BA et Baba SY</i>	
Étude géographique des circuits d'approvisionnement du poisson séché dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire	123
<i>Adjo Marie-Rose Josée ELAKOUA, Narcisse ABOYA, Kouassi Paul ANOH</i>	
Le retour de l'État dans l'aménagement de la périphérie sud-est d'Abidjan et ses implications	136
<i>Sanaliou KAMAGATE, Mamoutou TOURE et Sanassi DIAKITE</i>	
De l'analogie au numérique : potentialités et seuils pour l'expression cartographique et l'analyse géographique	153
<i>Dieudonné LEKANE TSOBGOU, Université de Dschang (Cameroun)</i>	
Cartographie des zones vulnérables au paludisme dans la commune de Zé au sud du Bénin	168
<i>Parfait Cossi. Alexis AHOHOUNDO et Aimé Bernardin TOHOZIN</i>	
Évènement culturel sur les berges du fleuve dénommé « festival sur le Niger » pour le rayonnement touristique de Ségou au Mali	186
<i>Moussa dit Martin TESSOUGUE</i>	
Maraîchers et espaces maraîchers à pointe-noire (République du Congo).....	207
<i>Hilarion Bagel MIZHAIRE et Yolande BERTON-OFOUEME</i>	

QUANTIFICATION DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE PAR DES INDICES STANDARDISES DE PRECIPITATIONS DANS LA VALLEE DU FLEUVE SENEGAL, DE 1980 A 2017

Cheikh FAYE¹, Djibrirou Daouda BA² et Baba SY²

¹Département de Géographie, U.F.R. Sciences et Technologies, UASZ, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, Ziguinchor (Sénégal).

²Laboratoire Leïdi « Dynamique des territoires et développement », Section de géographie, Université Gaston Berger de Saint-Louis, (Sénégal).

Résumé

Les sécheresses qui ont des répercussions sur la disponibilité de l'eau, la production agricole et les exploitations d'élevage, sont généralement identifiées et caractérisées à l'aide d'indices de sécheresse. La présente étude porte sur le potentiel d'utilisation de l'indice standardisé de précipitations (SPI) et de l'indice standardisé de précipitations-évapotranspiration (SPEI) basé sur les précipitations pour reproduire les sécheresses météorologiques observées dans la vallée du fleuve Sénégal. Les sécheresses historiques survenues de 1980 à 2017 ont été examinées et l'analyse du SPI montre un bon accord avec les épisodes de sécheresse enregistrés. Le SPI a également été utilisé pour étudier l'évolution temporelle de la sécheresse et sa gravité. Les sécheresses les plus graves dans le bassin se sont produites au cours des années 1983, 1984, 1992, 2014. L'intensité des sécheresses s'est avérée légère à modérée, malgré la présence de cas de sécheresse sévère à extrême comme en 1984. Les sécheresses les plus longues dans le bassin ont eu lieu au cours de la période 1980-1987, soit huit années consécutives. Les valeurs du SPI étaient parfois inférieures à -1 pour ces années sur des échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois. Les valeurs du SPI sur 12 mois sur cette période sont de -2,25 pour le pas de 1 mois, -1,7 pour les 3 mois, -1,2 pour les 6 mois et -2,2 pour les 12 mois. Ces valeurs du SPI suggèrent une sécheresse modérée (SPI 6 mois) à extrême (SPI 1 mois et 12 mois).

Mots-clés: Sécheresse, Intensité, Multi-échelle, Indice standardisé, Vallée du fleuve Sénégal

Abstract

Droughts that affect water availability, agricultural production and livestock operations are generally identified and characterized by drought indices. This study investigates the potential of using the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Precipitation Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) to reproduce the meteorological droughts observed in the Senegal River Valley. Historical droughts from 1980 to 2017 were reviewed and the IPS analysis shows a good agreement with recorded drought events. SPI has also been used to study the temporal evolution of drought and its severity. The most severe droughts in the basin occurred during the years 1983, 1984, 1992, 2014. The intensity of the droughts was light to moderate, despite the occurrence of severe to extreme drought as in 1984. The droughts were Longer periods in the basin occurred in eight consecutive years from 1980 to 1987. The SPI values were sometimes less than -1 for these years on time scales of 1, 3, 6 and 12 months. The 12-month SPI values for this period are -2.25 for the 1-month step, -1.7 for the 3-month period, -1.2 for the 6-month period and -2.2 for the 12-month period. These SPI values suggest a moderate drought (SPI 6 months) to extreme (SPI 1 month and 12 months).

Keywords: Drought, Intensity, Multi-scale, Standardized index, Senegal river valley

Introduction

Les processus extrêmes du système de la Terre ont continué à se manifester, notamment en termes de risques naturels dont les impacts sont ressentis par l'ensemble de la planète avec des conséquences particulièrement néfastes pour l'humanité. La sécheresse, un de ces processus physiques extrêmes, est souvent décrite comme un risque naturel dont les impacts sont complexes et se répercutent sur de nombreux secteurs de l'économie tels que les ressources en eau, l'agriculture et les écosystèmes naturels (D.S.M.Vicente-Serrano *et al.*, 2012, p.2 ; C. M. Botai *et al.*, 2016, p. 18 ; D.D. Ba 2018, p.10). En outre, il existe un ensemble de connaissances convaincant qui relie les sécheresses à d'autres catastrophes telles que la famine, les maladies et la dégradation des sols dans le monde. Ses caractéristiques et ses impacts sur l'écosystème et la société, en général, ont fait de la sécheresse l'objet de nombreuses études (C.Tan *et al.*, 2015, p1399 ; L.X.Zhang *et al.*, 2015, p.3375 ; L. Wang *et al.*, 2015, p.229; C. Faye *et al.*, 2015, p. 19 ; S.Parvaze *et al.*, 2018, p. 689 ; D.D. Ba 2018, p. 10 p). Au Sénégal, plusieurs indices de sécheresse ont été décrits et utilisés (B. A. Sy, 2008, p.131-136 ; C. Faye, 2017, p. 28; C. Faye *et al.*, 2017,p. 15, D. D. Ba, 2018, p. 92-99, D. D. Ba *et al.*, 2018, p. 64-66). Les ressources en eau au Sénégal sont caractérisées par une forte variabilité temporelle et spatiale (Faye, 2013, p. 10). De nombreuses zones du pays ont connu la pénurie d'eau, comme noté à Dakar qui avait été privée d'eau courante sur une partie du mois de septembre 2013 (C. Faye *et al.*, 2015, p. 19 ; C. Faye *et al.*, 2017, p. 15 ; C. Faye, 2017, p. 28). La vallée constitue la zone la plus vulnérable car localisée dans la partie nord du Sénégal, en zone sahélienne caractérisée, souvent, par de faibles quantités de précipitations annuelles de 200 à 300 mm (C. Faye *et al.*, 2017,p. 10). L'histoire de la vallée du fleuve Sénégal fut marquée par une succession de phénomènes extrêmes tels que les inondations et les sécheresses. Si les sécheresses représentent les événements extrêmes typiques qui se produisent dans le bassin, notamment de grandes crues en 1827, 1841, 1843, 1853(A. Kane, 2002, p. 2), entraînant des débordements du fleuve si grand que les maisons ont été envahies par l'eau qui est même montée jusqu'au premier étage des immeubles (Hardy, 1921). Cependant, les périodes de sécheresse fréquentes au cours des dernières années suggèrent la nécessité d'étudier la structure et la gravité des sécheresses dans la région. La sécheresse prolongée et l'absence de précipitations suffisantes ont entraîné la baisse de la disponibilité en eau. Cette baisse des écoulements peut impacter négativement sur de très nombreux secteurs d'activités (production agricole, industrie, alimentation en eau potable, navigation...), installant le bassin dans une crise écologique sans précédente (Tropica Environnemental Consultants, 2008, p. 110).La présente étude a donc été entreprise pour étudier les conditions de sécheresse dans la vallée du fleuve Sénégal sur une période de 38 ans (1980-2017), à travers les indices de sécheresse SPI et SPEI.

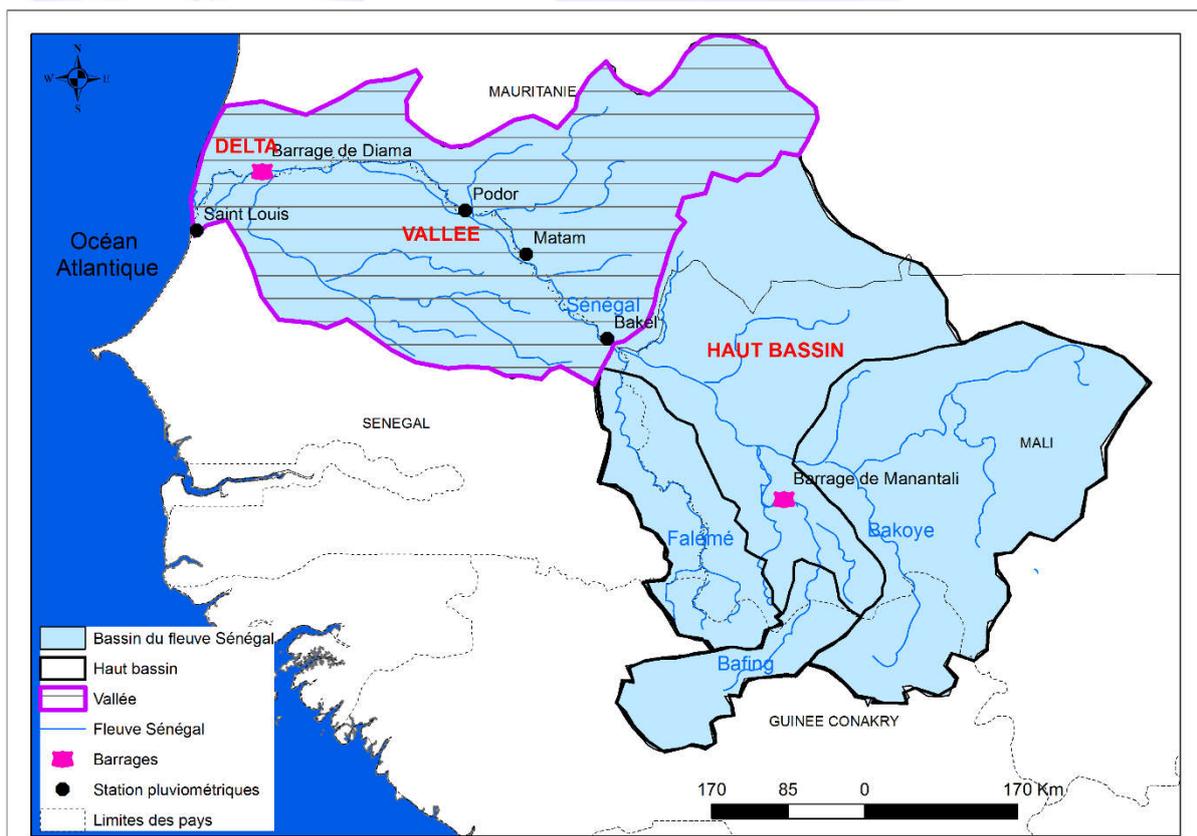
Zone d'étude

Le fleuve Sénégal est le deuxième plus grand fleuve d'Afrique de l'Ouest. Il est long de 1800 km et son bassin couvre une superficie de 300.000 km² (OMVS, Projet FEM/BFS, 2008, p. 5). Le bassin du fleuve Sénégal est occupé par une grande plaine qui s'étend des pieds des monts du Fouta Djallon jusqu'au nord du Sénégal (Région de Saint louis). Le fleuve Sénégal est formé par la réunion du Bafing et du Bakoye à Bafoulabé au Mali. Le *Bafing* qui est sa composante principale est long de 800 km et prend sa source dans le plateau central du massif

du Fouta Djallon, près de la ville de Mamou (Guinée). Sur son parcours guinéen, il reçoit les apports de la Téné et d'une soixantaine d'autres petits affluents (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le bassin du fleuve Sénégal est généralement découpé en trois entités (OMVS, Projet FEM/BFS, 2008, p. 5),

- le haut bassin : des sources du fleuve (le Fouta Djallon) à la confluence entre le fleuve Sénégal et la Falémé (en aval de Kayes et en amont de Bakel), il est en gros constitué des parties guinéenne et malienne du bassin du fleuve ;
- la vallée : de la confluence fleuve du Sénégal-Falémé à la limite de la remontée de la langue salée (Rosso Mauritanie), la vallée elle-même est divisée en trois parties : la haute vallée (entre la confluence Sénégal-Falémé et la confluence Sénégal Oued Gharfa, à la hauteur de Maghama en Mauritanie), la moyenne vallée (de la confluence Sénégal-Oued Gharfa à la limite ouest de l'Ile à Morphil à Podor) et la basse vallée (de Podor à Rosso Mauritanie) ;
- le delta : de Rosso Mauritanie à l'embouchure du fleuve.

Carte 2: Présentation du bassin du fleuve Sénégal, localisation de la vallée et des stations retenues



Les données pluviométriques et hydrologiques des stations retenues ont été obtenues pour la période 1980-2017. La zone d'étude et l'emplacement des stations météorologiques sont indiqués sur la carte 1. Le climat de la vallée du fleuve Sénégal est tropical, mais les conditions météorologiques diffèrent d'un lieu à un autre, les précipitations variant considérablement d'une station à l'autre.

La moyenne des précipitations annuelles dans la vallée est de 300 mm. Les données de température et de précipitations moyennes de la vallée du fleuve Sénégal sont présentées à la figure 2.

Données et méthodes

Données

Les données de base sont constituées de relevés de températures et de précipitations mensuelles provenant de 4 stations météorologiques (Bakel, Matam, Podor et Saint Louis). Les données ont été mises à notre disposition par l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM). Les données ont été utilisées pour calculer la température moyenne mensuelle et annuelle de toute la vallée du fleuve Sénégal sur une période de 38 ans (1980-2017). La pluie moyenne du bassin a été calculée à l'aide de la moyenne arithmétique, puis utilisée pour calculer des indices.

Méthodes

Dans cette étude, deux indices ont été utilisés : l'indice standardisé de précipitations-évapotranspiration (SPEI) et l'indice standardisé de précipitations (SPI). Le calcul des SPEI nécessite une série chronologique de données sur les précipitations mensuelles totales (P) ainsi que l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP). Les valeurs de l'ETP mensuelle ont été calculées par la méthode de Thornthwaite (M. Kouassi *et al.*, 2012, p. 292). La formule de détermination de l'ETP selon Thornthwaite se présente comme suit :

$$ETP(\text{mmois}) = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \times F(\gamma) \quad (1)$$

Où t est la température moyenne mensuelle en °C, et I est l'indice thermique annuel. Il est la somme des douze indices thermiques mensuels $i(m)$ et est donné par la formule suivante :

$$I = \sum_{m=1}^{12} i(m) \quad (2)$$

Avec $i(m)$, l'indice thermique mensuel qui se présente de la façon suivante :

$$i(m) = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514} \quad (3)$$

La variable a est une fonction complexe de l'indice thermique I avec :

$$a = 0,49239 + 1,79 \cdot 10^{-2}I - 7,71 \cdot 10^{-5}I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7}I^3 \quad (4)$$

$F(\gamma)$, le facteur correctif, est fonction de la latitude du lieu considéré et du mois donné. Les valeurs du facteur correctif sont tabulées.

Pour le calcul des SPI, McKee *et al.* (1993, p. 176) ont mis au point cet indice qui quantifie les anomalies de précipitations sur plusieurs étapes temporelles. La précipitation standardisée est calculée en divisant la différence de précipitation par rapport à la moyenne à long terme par l'écart type, où la moyenne et l'écart type sont déterminés à partir des enregistrements passés à long terme. Cette précipitation standardisée a ensuite été normalisée pour refléter la nature variable des précipitations et les valeurs de SPI ont été obtenues. Les valeurs de SPI sont exprimées offrent les probabilités d'occurrence correspondantes de chaque catégorie de sécheresse par rapport à la fonction de densité de probabilité normale (M. A. Khan et M.S.Gadiwala, 2013, p. 17).

McKee *et al.* (1993, p. 176) ont utilisé le système de classification suivant les valeurs de l'ISP et ont défini les critères pour un "événement de sécheresse" pour toutes les échelles de temps. Un événement de sécheresse se produit chaque fois que l'ISP est continuellement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine lorsque l'ISP devient positif. L'indice standardisé des précipitations (ISP) et l'indice standardisé de précipitations-évapotranspiration (SPEI) ont été calculés pour chaque intervalle de temps par la formule suivante :

$$SPI = \frac{(P_i - P_m)}{\sigma} \quad (5)$$

Avec P_i : la pluie du mois ou de l'année i ; P_m : la pluie moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée ; σ : l'écart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

McKee *et al.* (1993) ont également établi un critère pour la classification des conditions de sécheresse sur la base du SPI (tableau 1). L'intensité de la sécheresse est définie par la valeur de SPI. En général, les valeurs de SPI supérieures à zéro représentent des précipitations supérieures à la normale, tandis que les valeurs de SPI inférieures à zéro représentent des valeurs négatives et indiquent des précipitations inférieures à la normale. Le SPI peut être calculé pour différentes échelles de temps et peut fournir une alerte précoce en cas de sécheresse. En raison des similitudes dans les principes de calcul de SPEI et de SPI, la même classification est maintenue pour les SPEI (tableau 1).

Tableau 1: Classification des séquences de sécheresse selon les valeurs de SPI

Valeurs de l'ISP	Séquences de sécheresses	Valeurs de l'ISP	Séquences humides
$0,00 < SPI < -0,99$	Légèrement sèche	$0,00 < SPI < 0,99$	Légèrement humide
$-1,00 < SPI < -1,49$	Modérément sèche	$1,00 < SPI < 1,49$	Modérément humide
$-1,50 < SPI < -1,99$	Sévèrement sèche	$1,50 < SPI < 1,99$	Sévèrement humide
$SPI < -2,00$	Extrêmement sèche	$2,00 < SPI$	Extrêmement humide

Sur les bases de données chronologiques historiques à long terme, l'analyste peut dire l'impact de ces anomalies sur les domaines susmentionnés. La durée de la sécheresse peut être obtenue en comptant les mois du début à la fin des valeurs SPI négatives et leur magnitude en faisant la somme positive des valeurs SPI de tous les mois de la période de la sécheresse. Les SPI et SPEI pour la zone d'étude ont été calculés à des échelles de temps de 1 mois, 3 mois, 6 mois et 12 mois. Les SPI à 1 mois (août) reflètent relativement peu de temps l'humidité du sol pendant les saisons de croissance. Les SPI à 3 mois (juillet-septembre) fournissent une comparaison des précipitations sur une période spécifique de 3 mois avec les totaux de précipitations de la même période de 3 mois pour toute la série. Les SPI à 6 mois (juin-novembre) peuvent être très efficaces pour montrer la pluie sur les saisons distinctes. Les SPI à 12 mois (janvier-décembre) reflètent les modèles de précipitations à long terme.

Résultats

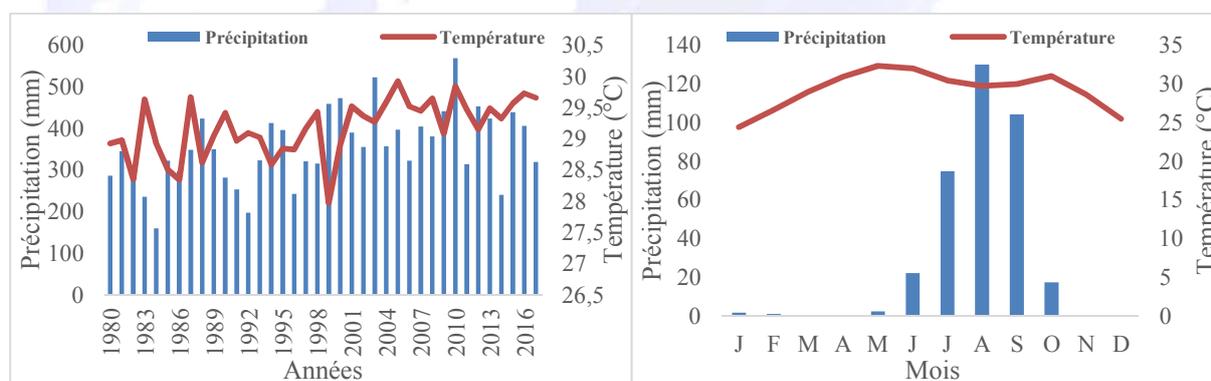
Il s'agira, d'abord de faire une présentation des résultats, dans un second temps ces résultats feront l'objet de discussion vis-à-vis d'autres travaux. Les résultats sont issus de traitement et d'analyse des données recueillies au niveau des stations pluviométriques. Ainsi, ils permettent de caractériser le phénomène de sécheresse dans la vallée du fleuve Sénégal.

Caractéristiques de la sécheresse

La sécheresse peut être définie comme un déséquilibre temporel de la disponibilité en eau consistant en une précipitation persistante inférieure à la moyenne, de fréquence, de durée et de gravité imprévisibles. Si elle se caractérise par un déficit hydrique, ce dernier a des interrelations avec les températures, surtout qu'elles sont élevées.

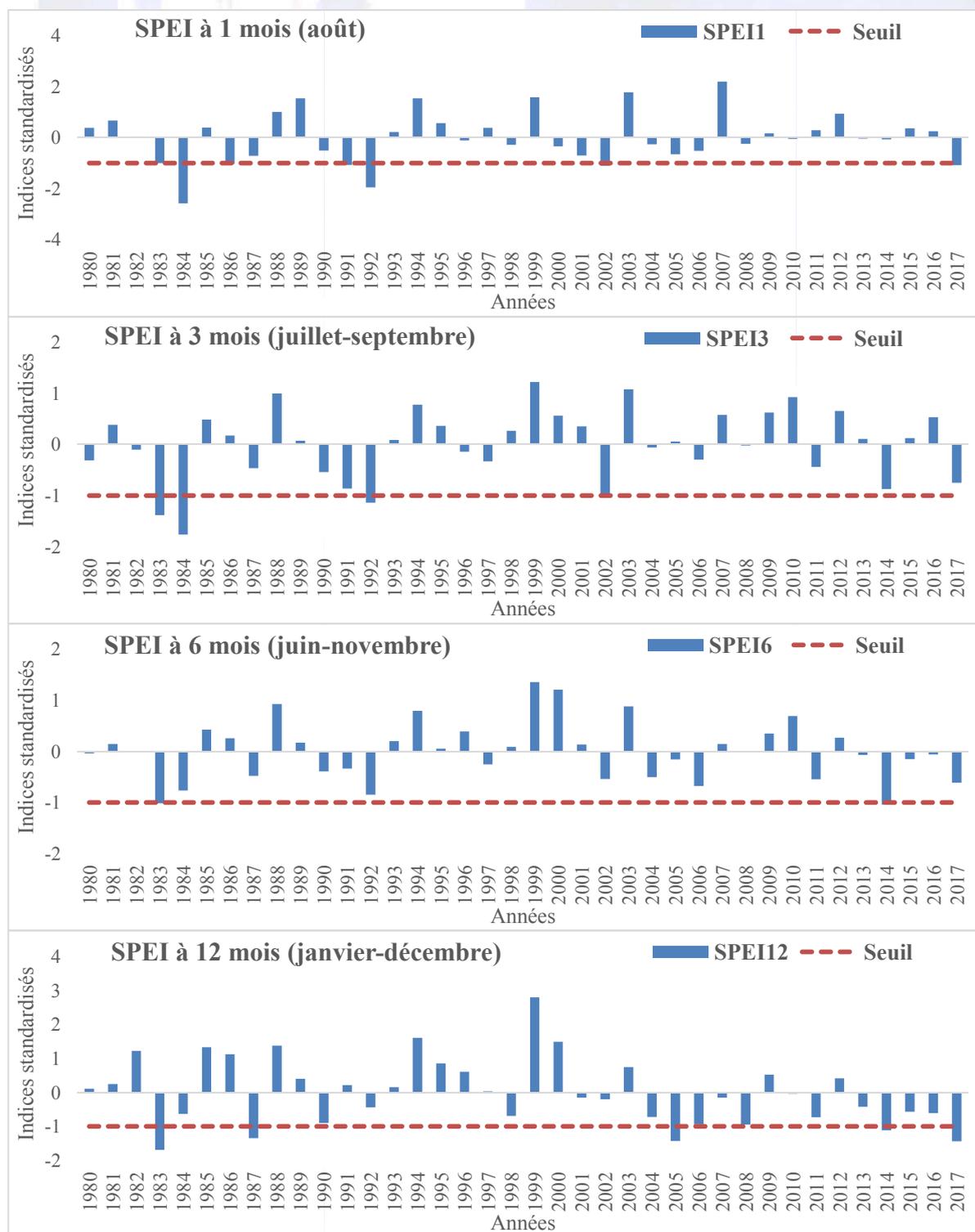
La vallée du fleuve Sénégal est caractéristique de la variation des précipitations et des températures mensuelles et annuelles moyennes sur la période 1980-2017 (figure 1).

Figure 1 : Evolution des précipitations et des températures dans la vallée du fleuve Sénégal de 1980 à 2017



L'analyse des tendances montre également une hausse des températures et une légère hausse des précipitations au cours des 38 dernières années. Cette hausse des températures est en phase avec les changements climatiques qui sont devenus l'un des plus grands problèmes au niveau mondial, régional et local. A l'échelle annuelle, on note une corrélation positive entre les totaux pluviométriques et la température moyenne, qui connaissent tous une augmentation au cours des 38 dernières années. A l'échelle mensuelle, les totaux pluviométriques les plus importants sont notés durant la saison des pluies, période durant laquelle, les températures sont relativement en baisse, du fait de la présence de l'humidité dans l'air qui accompagne les flux de mousson.

Figure 2 : Evolution des indices SPEI aux échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois dans la vallée du fleuve Sénégal de 1980 à 2017 (seuil inférieur en rouge)



La figure 2 illustre les séries temporelles des SPEI aux échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois dans la vallée du fleuve Sénégal de 1980 à 2017. Les quatre indices de sécheresse fournissent des résultats similaires liés à la variabilité et aux tendances de la sécheresse dans la zone d'étude. Les résultats indiquent notamment que les séries chronologiques SPEI à ces échelles de temps présentent une variabilité saisonnière et interannuelle de la sécheresse.

Comme l'illustre la figure 2, des indices positifs et négatifs existent au niveau de toutes les échelles. En outre, seules quelques stations présentent des tendances statistiquement significatives. L'échelle 12 mois porte les indices négatifs les plus bas de la série. Certains des résultats des SPEI contraste avec ceux des SPI qui sont les plus appropriés à caractériser la sécheresse dans la vallée.

Dans la présente étude, les SPI ont aussi été calculés à des échelles de temps de 1 mois, 3 mois, 6 mois, et 12 mois et les résultats indiqués sur la figure 4. L'influence de l'échelle de temps sur le nombre et la durée des sécheresses détectées est clairement apparente. Il a été observé que sur des échelles plus petites telles que les séries SPI-1 et SPI-3, les intensités de sécheresse sont très variables et deviennent inférieures à -1,0 à plusieurs reprises. Cependant, sur des délais plus longs tels que les séries SPI-6 et SPI-12, l'intensité de la sécheresse diminue. Cette variation est due à la grande variabilité de la pluviométrie dans le bassin, puisque le SPI est relatif aux caractéristiques pluviométriques de la zone (L. Ahmad *et al.*, 2017, p. 37).

Des événements de sécheresse ont été détectés pour chaque pas de temps. Le SPI à 1 mois indique des conditions à court terme et peut être étroitement associé à la sécheresse météorologique. Il est également utile pour évaluer l'humidité du sol et le stress des cultures, en particulier pendant la saison de croissance des cultures. Le SPI le plus bas sur un mois (mois d'août) sur la vallée du fleuve Sénégal était de -2,25 (extrêmement sèche), survenu au cours de l'année 1984. Un SPI à 3 mois spécifie l'humidité à moyen terme et offre une estimation des précipitations saisonnières. Un SPI sur 3 mois est plus utile pour souligner les conditions d'humidité existantes des principales régions agricoles que de nombreux autres indices hydrologiques. Le SPI le plus bas sur une période de 3 mois était de -1,7 (sévèrement sèche) toujours au cours de l'année 1984. Le SPI de 6 mois spécifie les tendances saisonnières à moyen terme des précipitations et est très efficace pour afficher les précipitations sur différentes saisons. Le SPI le plus bas sur une période de 6 mois était de -1,2 (modérément sèche), ce qui s'est produit en 1984. Les valeurs du SPI sur 12 mois sont généralement liées aux débits des cours d'eau, au niveau des réservoirs et même aux niveaux des eaux souterraines à des échelles de temps étirées. Le SPI le plus bas sur une période de 12 mois était de -2,2 (extrêmement sèche), ce qui s'est produit en 1984 (tableau 2).

Tableau 2: Nombre de périodes humides et sèches sur les différentes stations (1970-2016)

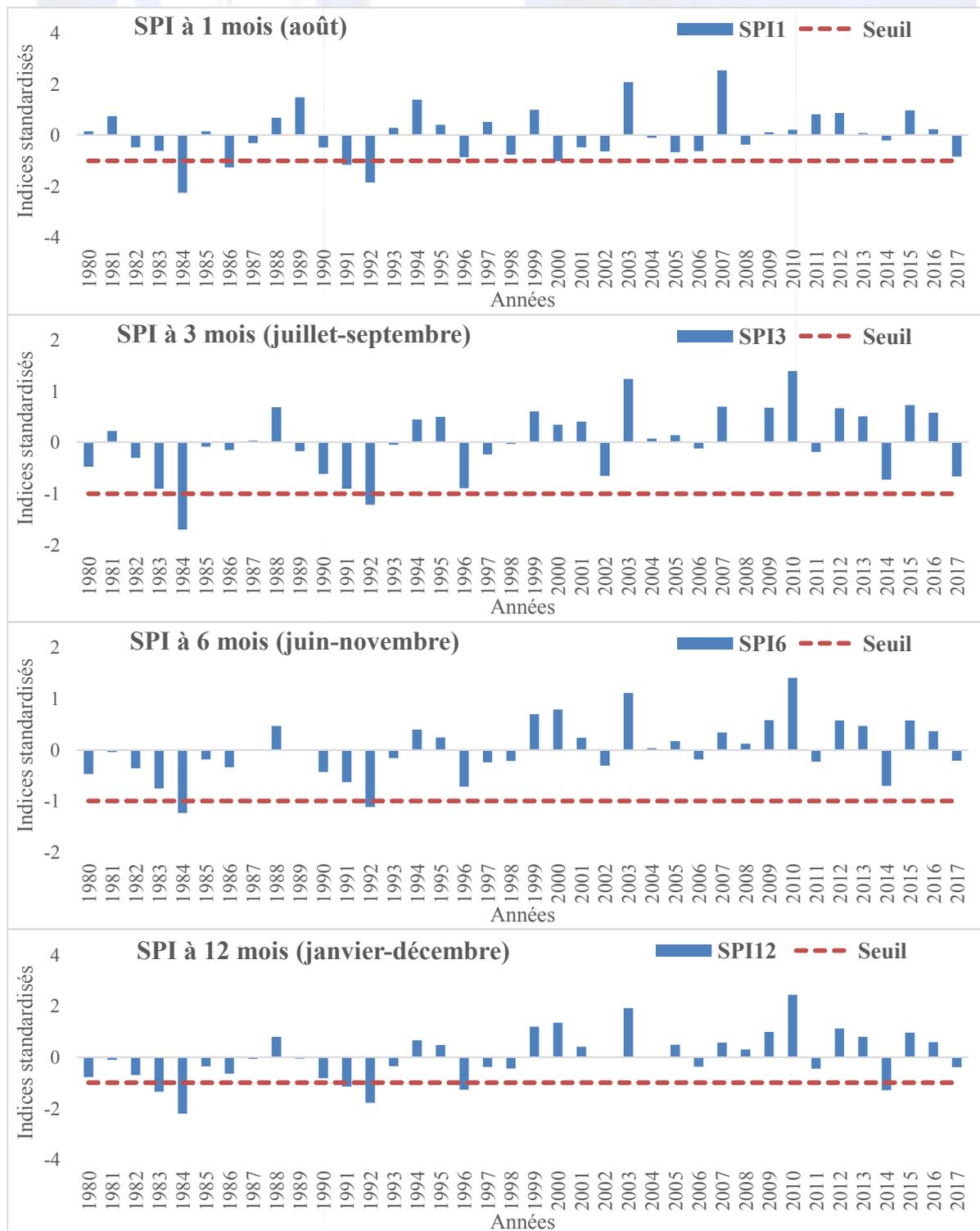
Années	SPI1	SPI3	SPI6	SPI12
Extrêmement humide	2	0	0	1
Sévèrement humide	0	0	0	1
Modérément humide	3	2	2	3
Légèrement humide	14	17	16	13
Légèrement sèche	14	17	18	14
Modérément sèche	3	1	2	4
Sévèrement sèche	1	1	0	1
Extrêmement sèche	1	0	0	1
Total	38	38	38	38

Le tableau 2 présente les différentes catégories de périodes sèches et humides et montre leur grande variabilité sur les différents pas de temps (figure 3).

L'indice de sécheresse SPI-12 a permis de voir les principales années de sécheresse sur le bassin entre 1980 et 2017. Pour la période d'étude, la sous-période 1980-1998 reste très largement déficitaire, seules trois années (1988, 1994 et 1995) y sont humides. En revanche, sur la période récente (1999-2017) qui est la période la plus humide, compte tenu du retour de la pluie, seules 4 sécheresses météorologiques ont eu lieu en 2006, 2011, 2014 et 2017, l'essentiel des sécheresses s'étant produit au cours des premières années. Cet excédent pluviométrique s'explique par l'augmentation des précipitations depuis la fin des années 1990, comme notée au niveau de la vallée.

La période 1999 à 2017 a donc été plus humide (son excédent par rapport à la normale est de 12%). De plus, les lignes de tendance des SPI suggèrent une augmentation de la nature des SPI à toutes les échelles. Cela implique que la fréquence des sécheresses dans le bassin a diminué au cours des deux dernières décennies. La tendance à la hausse des précipitations diminue donc la vulnérabilité du bassin à la sécheresse. La pire période de sécheresse a eu lieu sur la période 1980 à 1998 durant laquelle une durée de huit années consécutives de sécheresse a été observée dans la vallée. Le déficit pluviométrique au cours de ces années était proche de 16,2% de la normale (qui est de 354 mm) et les valeurs minimales de SPI étaient inférieures à -2 sur presque toutes les échelles de temps.

Figure 3 : Evolution des indices SPI aux échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois dans la vallée du fleuve Sénégal de 1980 à 2017 (seuil inférieur en rouge)



Les résultats ont montré que les indices SPI sont capables de reproduire les épisodes de sécheresse survenus dans la vallée du fleuve Sénégal au cours des 4 dernières décennies. Les événements de sécheresse détectés correspondent aux cas où la valeur de SPI dépasse un seuil donné, ce qui indique qu'une certaine zone est affectée par un événement. Les valeurs des SPI à différentes échelles de temps montrent que les sécheresses dans la vallée étaient

généralement d'intensité modérée à légère. Les sécheresses de 1984, 1992 et 2014 étaient des sécheresses sévères à extrêmes avec des valeurs de SPI-12 de -2,22, -1,79 et -1,30 respectivement (Figure 3).

Incidences des conditions de sécheresse sur l'agriculture et les ressources en eau dans la vallée

L'évaluation et le suivi de la sécheresse sont essentiels pour améliorer les décisions en matière de gestion et de planification de l'agriculture et des ressources en eau. En particulier, l'indice SPI est un indicateur de sécheresse couramment utilisé dans les régions vulnérables à la sécheresse. Cette étude a analysé les caractéristiques de la sécheresse à l'aide des valeurs de SPI dérivées des enregistrements de précipitations de 4 stations météorologiques réparties dans la vallée du fleuve Sénégal. La motivation à faire des études sur les caractéristiques de la sécheresse dans la vallée est due aux conditions de sécheresse persistantes dans le sahel. Ces conditions de sécheresse ont gravement touché divers secteurs, notamment l'agriculture et la disponibilité en eau. Les résultats rapportés dans cette contribution suggèrent que la vallée a connu une sécheresse modérée de 1980 à 2017. En particulier, les conditions de sécheresse semblent s'aggraver dans la partie sénégalaise de la vallée, couvrant les régions de Saint-Louis et de Matam (qui ne sont pas sous l'influence du fleuve Sénégal fortement régulé avec les barrages). Dans cette zone, une pluviométrie insuffisante associée à des températures élevées exacerbe souvent l'évapotranspiration, entraînant un stress des cultures et une perte d'eau dans les divers réservoirs d'eau.

Géographiquement, la vallée du fleuve Sénégal est caractérisée par une disponibilité en eau qui permet le développement de l'agriculture intensive, notamment la riziculture et le maraîchage. La sécheresse qui y est noté a donc affecté la production de ces cultures. L'agriculture joue un rôle important dans l'économie de la partie Nord du Sénégal et, par conséquent, la persistance de la sécheresse affectera négativement la région. En particulier, le secteur agricole est le principal employeur de la zone. Ce secteur a d'ailleurs poussé les autorités sénégalaises à se lancer dans un programme d'autosuffisance en riz pour une sécurité alimentaire. La multiplication des événements secs aura donc un impact significatif sur le secteur agricole, entraînant des pertes d'emplois, la hausse des prix des denrées alimentaires et d'autres impacts socio-économiques (Botai *et al.*, 2017, p. 18). En outre, une diminution des précipitations couplée à d'autres facteurs climatiques extrêmes (températures élevées, évapotranspiration), en particulier dans la zone, aggravera les conditions de sécheresse, entraînant un déclin important des eaux utilisables dans les réservoirs d'eau de la vallée.

Discussion des résultats

L'analyse des résultats des indices SPEI et SPI conforte de nombreuses études au Sénégal (B.A. Sy, 2008, p. 30; T. Sane *et al.*, 2008, p. 23; C. Faye, 2013, p.107 ; C. Faye *et al.*, 2015, p. 19 p, C. Faye *et al.*, 2017, p. 28) qui avaient conclu à un déficit pluviométrique depuis les années 1970. Des résultats similaires ont été également obtenus par L'Hôte *et al.* (2002) tout comme A. Ali et T. Lebel (2009, p. 1712) qui ont montré la persistance de la sécheresse durant les années 1970 dans toute l'Afrique de l'Ouest, le Sahel notamment. Sur la période la plus récente, depuis 2000, seules quatre années ont été déficitaires ; cette amélioration pluviométrique qui contraste avec les années précédentes de sécheresse également va dans le

même sens que certains auteurs qui estiment que la sécheresse est finie (S. Sene et P. Ozer, 2002, p.31 ; A.J. Niang *et al.*, 2008, p. 101 p ; P. Ozer *et al.*, 2010, p.90).Toutefois, ce retour à la normale est à nuancer car la variabilité pluviométrique dans la vallée et le bassin du Sénégal continue même au cours des dernières années (A. Bodian *et al.*, 2011, p.123 ; S. Sow et D. Gaye, 2016, p.177). La même situation est constatée ailleurs en Afrique (L. D. M.G.Quenum *et al.*, 2016, p. 335) et en Asie où elle se vérifie aussi au Ningxia nord et au Shaanxi nord en Chine (W.Wu, 2003, p. 30) ce qui laisse penser qu'elle serait d'échelle planétaire.

Au plan méthodologique, ce travail confirme la pertinence de la démarche consistant à distinguer les périodes sèches caractérisées de quelques heures (à court terme) à des milliers d'heures (à long terme). En conséquence, les indices de sécheresse prennent généralement en compte les sécheresses à court terme (trois mois ou moins), les sécheresses à moyen terme (de 4 à 9 mois) et les sécheresses à long terme (12 mois ou plus). Les sécheresses à court terme ont un impact sur la disponibilité de l'eau dans la vallée et sont donc essentiellement des sécheresses météorologiques et agricoles. D'autre part, les sécheresses à long terme affectent également les ressources en eaux de surface et souterraines et donc la sécheresse hydrologique (C. M. Botai *et al.*, 2016, p. 18).L'augmentation des conditions de sécheresse aura donc un impact significatif sur le secteur agricole, entraînant des pertes d'emplois, la hausse des prix des denrées alimentaires et d'autres impacts socio-économiques (C. M. Botai *et al.*, 2017, p. 3). En outre, une diminution des précipitations couplée à d'autres facteurs climatiques extrêmes (températures chaudes, évapotranspiration), en particulier dans la zone, aggravera les conditions de sécheresse, entraînant un déclin important des eaux utilisables dans les réservoirs d'eau de la vallée (M. Faye, *et al.*, 2018, p.13).

En dépit du déficit très fréquent, dans les quatre stations, la plupart des années ont connu une pluviométrie en deçà de la moyenne locale. Des années humides ont été enregistrées, surtout avant la rupture et depuis la fin des années 1990. Cependant, l'évolution irrégulière de la pluviométrie durant ces dernières années ne permet pas de confirmer le retour à la normale évoqué par certains auteurs (S. Sow et D. Gaye, 2016, p. 177; D.D. Ba, 2018, p. 94) et la récente augmentation des pluies dans le Sahel (P. Ozer, *et al.*, 2015, p.15).En effet, depuis le milieu des années 1990, « un retour à de meilleures conditions pluviométriques au Sahel est noté mais il s'accompagne d'une plus forte variabilité interannuelle des précipitations » (OCDE / CSAO, 2008, p. 2). En sus, la hausse des températures est en phase avec les changements climatiques qui sont devenus l'un des plus grands problèmes environnementaux à l'échelle mondiale, régionale et locale.

A noter également que la courte durée de la saison pluvieuse révélée par les indices SPEI et SPI impacte, à la fois, sur les rendements agricoles et sur le couvert végétal. Cette sécheresse météorologique est symptomatique d'une sécheresse agricole et édaphique (M.Mainguet, 1995, p. 20) qui explique, en partie, le recul de l'agriculture sous pluie et les longs déplacements des éleveurs (D. D. Ba, 2018, p.92).

Conclusion

Afin de déterminer le risque potentiel de sécheresse à l'avenir, il est essentiel d'analyser en profondeur les sécheresses. L'impact de la sécheresse dépend de la gravité, de la durée et de l'étendue spatiale du déficit pluviométrique. La vallée du fleuve Sénégal, jouit d'un climat sahélien, ce qui la rend particulièrement vulnérable aux risques de sécheresse. Dans cet article, les indices SPI et SPEI sur des échelles de temps de 1, 3, 6 et 12 mois ont été analysés pour étudier les caractéristiques de la sécheresse. Le but de la présente étude était de comprendre les caractéristiques de la sécheresse (par exemple, son évolution, sa fréquence, son intensité et sa sévérité) plutôt que de comparer les indices SPI et SPEI. La série chronologique des SPI moyens de 1 et 3 mois pour le bassin a révélé que les sécheresses à court terme ne sont pas autant courantes que les sécheresses à moyen et long terme sur 6 et 12 mois pendant la période considérée. Les sécheresses à long terme dans le bassin ont varié en intensité, d'extrêmes à légères. L'étude a confirmé que les sécheresses à long terme de 1983, 1984, 1992, 2014 avaient un caractère grave. En outre, selon les calculs de SPI, le nombre de sécheresses est largement plus important sur la période 1980-1998 que sur la période 1999-2018 où seulement 4 cas de sécheresse sont notés.

Comme les sécheresses météorologiques constituent la première étape de la progression des sécheresses agricoles ou hydrologiques ultérieures, cette méthodologie pourrait être utilisée pour apporter une réponse de gestion en cas de sécheresse, qui commence par une valeur seuil spécifique. De plus, cette méthodologie peut être utilisée pour remédier au manque d'informations sur la durée, l'extension ou l'intensité géographique des sécheresses. Les résultats de l'étude peuvent également contribuer aux études sur les changements climatiques afin de comprendre les modèles historiques et d'élaborer des scénarios futurs d'occurrences de la sécheresse.

Références bibliographiques

- AHMAD L., PARVASE S., MADJID M. & KANTH R. H. (2016), Analysis of Historical Rainfall Data for Drought Investigation Using Standard Precipitation Index (SPI) Under Temperate Conditions of Srinagar Kashmir, 13(25), 29-38.
- ALI A., LEBEL T. (2009) The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, 29 (12), 1705-1714.
- BA D. D. (2018), Sécheresse climatique, dynamique actuelle et perspectives des activités agropastorales dans le Ferlo et la Moyenne Vallée du fleuve Sénégal (Région de Matam). Thèse de doctorat unique, Université Gaston Berger de Saint-Louis. Section de géographie, 196 p.
- BODIAN A., DACOSTA H. et DEZETTER A. (2011). « Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique » in *Physio-Géo*, volume V. France, pp.107-124.
- BOTAI C. M., BOTAI J.O., DLAMINI L.C., ZWANE N. S. & PHADULI E. (2016), Characteristics of Droughts in South Africa: A Case Study of Free State and North West Provinces, *Water*, 8, 439, 1-23.
- BOTAI C. M., BOTAI J. O., de WIT J. P., NCONGWANE K. P. & ADEOLA A. M. (2017), Drought Characteristics over the Western Cape Province, South Africa. *Water*, 9, 876, 1-16.

- FAYE C. (2013), *Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé*. Thèse (PhD). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 309 p.
- FAYE C. (2015), Caractérisation des basses eaux : les effets durables du déficit pluviométrique sur les étiages et le tarissement dans le bassin du Bakoye. *Espaces et Sociétés en Mutation* (Numéro Spécial), 109 à 126.
- FAYE C., 2017 :Caractéristiques de la Sécheresse au Sénégal : Méthodes d'analyses, Types d'impacts et Modèles de gestion. Publié aux *Editions Universitaires Européennes*, 233 p.
- FAYE C., SOW A.A. & NDONG J.B. (2015), Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo*, 9, 17-35.
- FAYE C., NDIAYE A. et MBAYE I. (2017), Une évaluation comparative des séquences de sécheresse météorologique par indices, par échelles de temps et par domaines climatiques au Sénégal. *Journal. wat. env. sci*, 1 (1),11-28.
- FAYE M. , FALL A., FAYE G. & VAN HECKE E. (2018).La variabilité pluviométrique et ses incidences sur les rendements agricoles dans la région des Terres Neuves du Sénégal oriental, *Belgeo 1*, 2018, 17 p.
- KANE A. (2002), Crues et inondations dans la basse vallée du fleuve Sénégal. *Gestion intégrée des zones inondables tropicales*, IRD Éditions, 2002, 197-208.
- KHAN M.A., GADIWALA M.S. (2013), A Study of drought over Sindh (Pakistan) using Standardized Precipitation Index (SPI) 1951 to 2010. *Pakistan Journal of Meteorology*, 9(18), 15-22.
- KOUASSI A.M., N'GUESSAN B.T.M., KOUAME K.F., KOUAME K.A., OKAINGNI J.C. & BIEMI J. (2012), Application de la méthode des simulations croisées a l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M: cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Géoscience*, Tome 344, 288-296.
- MAINGUET M. (1995), *L'homme et la sécheresse*. Paris Masson, 335p.
- MCKEE, T.B., DOESKEN, N.J. & KLEIST J. (1993), The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA: American Meteorological Society.
- NIANG A.J., OZER A. & OZER P. (2008), Fifty years of landscape evolution in South-Western Mauritania by means of aerial photos. *Journal of Arid Environments*, 72: 97-107
- OCDE / CSAO (2008), *Climat, changements climatiques et pratiques agro-pastorales en zones sahélienne (en vue de la conférence de haut niveau sur la sécurité alimentaire mondiale : les défis du changement climatique et des bioénergies)*, 8 p.
- OMVS, *Projet FEM/Bassin du Fleuve Sénégal (2008), Plan d'Action Stratégique de Gestion des Problèmes Environnementaux Prioritaires du Bassin du Fleuve Sénégal, Version finale*, 133 p.
- OZER P., HOUNTONDI Y.C., NIANG A.J., KARIMOUNE S., LAMINO MANZO O. & SALMON M. (2010), Désertification au Sahel: Historique et perspectives. *BISGL*, 54: 69-84.
- OZER P., DJABY B., DE LONGUEVILLE F., (2015). *Evolution récente des extrêmes pluviométriques au Niger (1950-2014)*, Workshop « Coopération Universitaire au Développement avec le Niger », Université de Liège, 18 p.

- PARVAZE S., AHMAD L. (2018), Meteorological Drought Quantification with Standardized Precipitation Index for Jhelum Basin in Kashmir Valley. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management* · March 2018 , 7 (4), 688-697.
- QUENUM L. D. M.G., ALAMOU A. E, LAWIN E. A, BADOU D.F. et AFOUDA A. A. (2016). «Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin de l’Ouémé, Bénin » in *Afrique SCIENCE 12(3) (2016), pp.315 – 328*
- SANE T., DIOP M., SAGNA P. (2008), Etude de la qualité de la saison pluvieuse en Haute-Casamance (Sud Sénégal). *Sécheresse*, 19: 23-28.
- SENE S., OZER P. (2002) Evolution pluviométrique et relation inondations - événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 42: 27-33.
- SOW S. et GAYE D. (2016), Impacts des variations pluviométriques sur les écoulements de surface dans la vallée du Sénégal. *Revue de Géographie de l’Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO N° 05, Vol. 2, pp. 167-183.*
- SY B. A. (2008), *Milieus, sécheresse climatique et érosion éolienne, étude géomorphologique du sahel sénégalais*. Thèse de doctorat d’État, Université Gaston Berger de Saint-Louis. Section de géographie, 429 p.
- TAN C., YANG J. & LI M. (2015), Temporal-spatial variation of drought indicated by SPI and SPEI in Ningxia Hui Autonomous region, China. *Atmosphere*, 6, 1399–1421.
- Tropica Environnemental Consultants, 2008 : EIES Pipeline Eaux Falémé SMC, Rapport d’audience publique dans le cadre de l’étude d’impact environnemental du projet d’installation et d’exploitation d’une conduite de pompes d’eau de la Falémé vers la mine de la Sabodala Mining Company. 176 p.
- VICENTO-SERRENO S.M., BEGURIA S.; EKLUND L., GIMENO G., WESTON D., KENAWY A.E., LOPEZ- J.I., NIETO R., AYENEW T., KONTE D., et al. 2012 :Challenges for drought mitigation in Africa: The potential use of geospatial data and drought information systems. *App. Geogr.*, 34, 471–486.
- WANG L., CHEN W., ZHOU W. & HUANG G., 2015 : Drought in Southwest China: A review. *Atmos. Ocean. Sci. Lett.*, 8, 339–344.
- WILHITE D.A., SVOBODA M.D., HAYES M.J., 2007 : Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resour. Manag.*, 21, 763–774.
- WU W. (2003). *Application de la géomatique au suivi de la dynamique environnementale en zones arides : Exemple de la région de Nouakchott en Mauritanie, du Ningxia nord et du Shaanxi nord en Chine du nord-ouest* –Thèse de doctorat de géographie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 217 p.
- ZHANG L.X., ZHOU T.J. (2015), Drought over East Asia: A review. *J. Clim.*, 28, 3375–3399.