

## **Analyse de l'évolution spatio-temporelle des dérivés pluviométriques caractérisant la saison agricole au Sahel - Central**

Seydou TINNI HALIDOU<sup>1,2\*</sup>, Agali ALHASSANE<sup>2</sup>, Issaka LONA<sup>2</sup> et Ibrahim BOUZOU MOUSSA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Abdou Moumouni de Niamey, Département de Géographie, Laboratoire d'Étude et de Recherche sur les Territoires Sahélo-sahariens : Aménagement et Développement, BP 418, Niamey, Niger

<sup>2</sup> Centre Régional AGRHYMET-CRA-AOS/CILSS, Département Information et Recherche, BP 11011, Niamey, Niger

(Reçu le 06 Juillet 2021 ; Accepté le 21 Décembre 2021)

---

\* Correspondance, courriel : [seydoutinni@gmail.com](mailto:seydoutinni@gmail.com)

### **Résumé**

L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution spatio-temporelle des dérivés pluviométriques impactant la qualité de la saison agricole, notamment les périodes de début et de fin de saison, le cumul des pluies, le nombre de jours des pluies, la longueur de la saison et les séquences sèches. Elle s'appuie sur l'analyse des données journalières de 1951 à 2010 de 98 stations météorologiques. Les dérivés pluviométriques sont d'abord identifiés, ensuite, des indices adaptés sont utilisés pour caractériser leurs évolutions. Ces dérivés présentent des fortes variabilités spatiales et temporelles. Cela a permis de subdiviser la région en quatre (4) zones avec des caractéristiques moyennes très distinctes. Ainsi, la Zone I, dont les dates de début et de fin de saison sont respectivement le 15 juillet  $\pm 6$  et le 7 septembre  $\pm 14$ , soit  $54 \pm 7$  jours, reçoit 200 mm de pluie en  $13 \pm 2$  jours pluvieux ; Quant à la Zone II, le 20 juin  $\pm 10$  et le 15 septembre  $\pm 5$  marquent le début et de fin de la saison agricole, soit  $88 \pm 14$  jours, reçoit 380 mm de pluies en  $26 \pm 5$  jours pluvieux; Pour la Zone III, elle reçoit 643 mm de pluies entre le 26 mai  $\pm 9$  (date de début) et le 29 septembre  $\pm 4$  (date de fin), soit  $126 \pm 12$  jours dont  $41 \pm 4$  pluvieux; Enfin, la zone IV, reçoit en moyenne 943 mm de pluies entre les dates de début (5 mai  $\pm 13$ ) et de fin (13 octobre  $\pm 6$ ), soit une longueur de  $161 \pm 17$  jours, dont  $58 \pm 9$  jours pluvieux. L'étude ressort que les extrêmes des dérivés pluviométriques sont plus fréquents dans les zones Nord que Sud. En plus, elle conforte l'hypothèse selon laquelle ces paramètres clés de la saison agricole sont très variables. Par conséquent, il est important de tenir compte de ces informations dans la prévision de ces paramètres, considérés comme des produits utiles particulièrement dans la planification agricole et la prise de décision pour l'amélioration de la productivité agricole et de la sécurité alimentaire.

**Mots-clés :** *évolution spatio-temporelle, dérivés pluviométriques, saison agricole, Sahel-central.*

### **Abstract**

**Analysis of the spatio-temporal evolution of rainfall derivatives characterizing the agricultural season in the Sahel - Central**

The aim of this study is to analyse the spatio-temporal evolution of derived-rainfall parameters that impact the quality of the agricultural season. These parameters are the onset and cessation of the season, the

cumulative rainfall, the number of rain days, the length of the season and the dry spells. It is focused on the analysis of daily data from 1951 to 2010 of 98 weather stations. Derived-rainfall parameters are firstly identified, then adapted indices are used to characterize their evolution. These derived-rainfall present strong spatial and temporal variability. The analyses allowed the region to be subdivided into four (4) main zones with distinct characteristics. Thus, Zone I, whose onset and cessation dates are respectively July  $15 \pm 6$  and September  $7 \pm 14$ , corresponding to  $54 \pm 7$  days, receives 200 mm of rainfall in  $13 \pm 2$  rain days; Zone II, June  $20 \pm 10$  and September  $15 \pm 5$  mark the onset and cessation of the agricultural season, corresponding to  $88 \pm 14$  days, and receives 380 mm of rainfall in  $26 \pm 5$  rain days; Zone III received 643 mm of rainfall between May  $26 \pm 9$  (onset) and September  $29 \pm 4$  (cessation), corresponding to  $126 \pm 12$  days, of which  $41 \pm 4$  were rain days; finally, Zone IV received an average of 943mm of rainfall between the onset (May  $5 \pm 13$ ) and cessation (October  $13 \pm 6$ ) dates, corresponding to the length of  $161 \pm 17$  days, of which  $58 \pm 9$  were rain days. The study shows that the derived-rainfall parameters extremes are more frequent in the northern than in the southern areas. Consequently, the study supports the hypothesis that these key parameters of the agricultural season are highly variable. Therefore, it is important to take into account this information in the forecast processes, which are considered as useful products particularly for planning of agricultural activities and decision-making process to improve agricultural productivity for food security.

**Keywords :** *spatio-temporal evolution, derived-rainfall parameters, agricultural season, Central-Sahel.*

## 1. Introduction

Dans la zone sub-saharienne de l'Afrique de l'Ouest, l'Agriculture est la principale source de subsistance et constitue le mode de vie de 95 % des populations [1]. Elle emploie plus de 60 % de la population active, mais contribue à seulement 35 % du Produit Intérieur Brut [2], du fait de la conjugaison de plusieurs facteurs incluant les extrêmes agroclimatiques. A ces contraintes s'ajoute le contexte socio-économique souvent défavorable à la production agricole [3]. Ces conditions imposent donc le choix de techniques agricoles adéquates (variétés, calendriers agricoles, etc.) pour améliorer les rendements agricoles et réduire les effets négatifs des déficits pluviométriques, comme ce fut le cas dans la zone en 1972-1973, 1983-1984 et 1997. Cette irrégularité des pluies, se traduisant souvent par une diminution du nombre d'événements pluvieux, une augmentation du nombre d'épisodes secs et une baisse de la contribution des mois pluvieux (juillet-août-septembre), a pour corollaire l'occurrence de fortes pluies, des inondations, des vents violents, la pullulation d'ennemis de cultures et des canicules qui impactent négativement la production agricole, les moyens d'existence et la sécurité alimentaire des populations. L'agriculture et l'élevage sont les secteurs le plus exposés à ces risques liés au climat, du fait notamment de la dégradation des terres et de la baisse de la productivité des ressources en eau. Par manque de pratiques agricoles adaptées, les niveaux de production resteront très variables. Pour ce faire, il est important de comprendre la distribution spatiale et l'évolution temporelle de paramètres clés de la saison agricole afin d'aider les agriculteurs à optimiser leurs activités de production. L'identification des variables caractérisant la saison des pluies se fait par plusieurs méthodes dont celles de l'Analyse en Composantes Principales [4], de la dynamique atmosphérique [5] et du bilan hydrique [6,7]. En Afrique de l'Ouest, certains auteurs [6] ont estimé les cumuls de pluies mensuels et saisonniers, du début à la fin de la saison des pluies, en utilisant uniquement des données de surface. La définition de la date de démarrage de la saison des pluies dépend du type et du secteur d'application et, les critères les plus utilisés pour la déterminer sont souvent d'ordres spatial (climatique), ponctuel (hydrologique et agronomique) et synoptique (météorologique) [8, 9]. Il en est de même pour la fin de la saison. Pour estimer la longueur de la saison des pluies, les méthodes directes sont généralement basées sur des seuils de

précipitations [6], des approches relatives [10] et des techniques de probabilité de précipitation [11]. Les méthodes indirectes sont basées sur les modèles [12] et sur la technique Thêta-E [13]. Quant aux séquences sèches et humides, elles s'estiment en nombres de jours consécutifs avec des pluies supérieures ou inférieures à des seuils établis variant entre 0,85 et 3 mm, en fonction des réalités des régions et des domaines d'application [14]. Les analyses des caractéristiques d'épisodes pluvieux et secs peuvent se faire à partir des observations localisées [15]. Dans la région, la qualité de la saison agricole est intimement liée au nombre de jours de pluies, dont l'impact sur la croissance et le développement des cultures est non négligeable. Ceci montre la nécessité de comprendre la variabilité et la fréquence des DPSCa, afin de mettre en place des systèmes d'alerte précoce et des infrastructures adaptées [16]. Cette étude vise à contribuer à l'amélioration des connaissances sur l'évolution spatio-temporelle des Dérivés Pluviométriques Caractérisant la Saison Agricole (DPSCa) en Afrique de l'Ouest, plus particulièrement au Sahel-central (le cumul pluviométrique, les dates de début et de fin de la saison agricole, les séquences sèches et la longueur de la saison) et à caractériser les différentes zones qui en résultent.

## 2. Méthodologie

Les données utilisées sont des données journalières de pluies de 1951 à 2010 de 98 stations réparties sur la zone d'étude. Elles ont été analysées afin de dériver les paramètres clés permettant de caractériser la saison agropastorale. Dans les analyses, un jour est pluvieux lorsqu'il enregistre une quantité de pluie de plus de 0,85mm. Les paramètres analysés sont les cumuls pluviométriques de la saison agricole (CPSa), les dates de début de la saison agricole (DDSa), les dates de fin de la saison agricole (DFSa), les longueurs de la saison agricole (LSa), les longueurs maximales des séquences sèches dans la saison agricole (SSa) et les nombres de jours de pluie de la saison agricole (JPSa). Ces paramètres sont calculés sur la base des critères consensuels utilisés lors des forums des Prévisions Saisonnières Agro-hydro-climatiques pour les zones Soudanienne et Sahélienne (PRESASS), [17, 18].

### 2-1. Détermination des dates de début de saison agricole

Le critère utilisé pour les pays sahéliens consiste à considérer la DDSa, lorsqu'après le 15 mars, un cumul pluviométrique d'au moins 20 mm est enregistré en un à trois jours consécutifs, sans qu'il ne soit observé un épisode sec de plus de 20 jours dans les 30 jours qui suivent. Pour les stations situées au Nord de l'isohyète 400 mm, le début de la saison est détecté lorsqu'une quantité de pluie de 15 mm est obtenue, à partir du 1<sup>er</sup> mai, en un à trois jours consécutifs sans un épisode sec de plus de 20 jours dans les 30 jours qui suivent. Pour les parties Nord des pays du Golfe de Guinée à régime pluviométrique monomodal (latitude > 8°N), la DDSa est observée lorsqu'à partir du 15 mars une pluie d'au moins 20 mm est enregistré en un à trois jours consécutifs, sans un épisode sec de plus de 10 jours dans les 30 jours qui suivent.

### 2-2. Détermination des dates de fin de la saison agricole

Pour les pays sahéliens, la DFSa est observée lorsqu'après le 1<sup>er</sup> septembre (15 septembre pour l'Ouest Mali, la Mauritanie, le Sénégal et la Gambie), quand un sol capable de contenir 70 mm d'eau s'assèche suite à une évapotranspiration quotidienne de 5 mm. Dans les parties Nord des pays du Golfe de Guinée, la fin de la saison est observée lorsqu'à partir du 1<sup>er</sup> octobre, un sol capable de contenir 70 mm d'eau est complètement épuisé suite à une évapotranspiration journalière de 4 mm.

### 2-3. Calcul des durées de séquences sèches

La durée de séquence sèche (SSa) est le nombre de jours consécutifs sans pluies ( $P \leq 0,85$  mm) le plus long observé entre la DDSa et la DFSa (*Equation 1*).

$$SSa = \sum_i^y j_{cs_{max}} \quad (1)$$

Avec:  $i = DDSa$ ;  $y = DFSa$  et  $j_{cs} =$  jours consécutifs secs

### 2-4. Calcul du cumul pluviométrique saisonnier

Le CPSa est la somme des quantités de pluies journalières ( $P > 0,85$  mm) observées entre la DDSa et la DFSa (*Equation 2*).

$$CPSa = \sum_i^y P \quad (2)$$

Avec:  $i = DDSa$ ;  $y = DFSa$  et  $P =$  quantité de pluie journalière

### 2-5. Calcul de la longueur de la saison agricole

La longueur de la saison agricole (LSa) est le nombre de jours entre la DDSa et la DFSa (*Equation 3*).

$$LSa = DFSa - DDSa \quad (3)$$

### 2-6. Calcul du nombre de jours de pluies

Le nombre de jours de pluies utiles pour les cultures pendant la saison agricole (JPSa) est la somme des jours ayant enregistré une pluie supérieure à 0,85 mm, entre la DDSa et la DFSa (*Equation 4*).

$$JPSa = \sum_i^y Jp \quad (4)$$

Avec:  $i = DDSa$ ;  $y = DFSa$  et  $Jp =$  Jour de pluie

### 2-7. Coefficient de variation

Le coefficient de variation est une mesure relative de la dispersion des données autour de la moyenne. Il a été calculé comme étant le ratio de l'écart-type rapporté à la moyenne et est exprimé en pourcentage (*Equation 5*).

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100\% \quad (5)$$

Où,  $cv =$  coefficient de variation;  $\bar{x} =$  moyenne de la série et  $\sigma =$  écart type ou déviation standard de la série

### 2-8. Test d'homogénéité

Le travail préliminaire a consisté à étudier le comportement des séries de données temporelles afin de détecter les périodes de ruptures qu'elles comportent et les caractéristiques à considérer pour reconstituer des séries homogènes. Le logiciel XLSTAT a été utilisé pour faire l'étude d'homogénéité des séries

chronologiques, en appliquant le test statistique non paramétrique de Pettitt [19]. Lorsque le test de Pettitt donne une valeur significative ( $\alpha < 0,05$ ), la série globale est découpée en deux sous séries correspondant aux valeurs significatives obtenues. Dans cette étude, les ruptures constatées ont été remplacées par les valeurs moyennes sur le long terme afin de combler les valeurs manquantes.

**2-9. Test de tendance de Mann-Kendall**

Le test bilatéral des séries temporelles de Mann-Kendall a été appliqué pour analyser les tendances sur les données historiques. Il a été appliqué pour déterminer la valeur de  $\rho$ , avec une correction de continuité. Pour l'interprétation, les hypothèses nulle ( $H_0$ ) et alternative ( $H_a$ ) sont utilisées avec un niveau de détermination alpha ( $\alpha$ ) de 0,05 pour un intervalle de confiance de 95 %.

- $H_0$  : Il n'y a pas de tendance dans la série ;
- $H_a$  : Il existe une tendance dans la série.

Si la valeur de  $\rho$  calculée est inférieure au niveau de signification  $\alpha$ , on doit rejeter  $H_0$  et retenir  $H_a$ . Par contre, si  $\rho$  est supérieure à  $\alpha$ , l'hypothèse  $H_0$  est maintenue.

**2-10. Indice de tendance d'évolution temporelle**

Les tendances intra-saison agricole tels que les CPSa, les JPSa, les DDSa, les DFSa, les LSa, les SSa ont été caractérisées par des indices d'anomalies standardisés [20], (*Equation 6*).

$$I = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \tag{6}$$

Où,  $x_i$  = observation pour l'année  $i$ ;  $\bar{x}$  = moyenne de la série et  $\sigma$  = écart type ou déviation standard de la série

L'indice de précipitation normalisé est utilisé pour analyser les périodes humides et sèches [21]. Il permet aussi de générer le temps de retour ou la fréquence de chaque catégorie et de détecter les situations extrêmes. La même méthodologie a été adaptée aux autres paramètres dérivés de la pluviométrie (*Tableau 1*).

**Tableau 1 : Caractérisation des indices de DPSCa, Valeurs d'indices adaptées du SPI**

Indice	Caractérisation de l'indice					
	CPSa	DDSa	DFSa	LSa	JPSa	SSa
>2	Extrêmement humide	Extrêmement tardive	Extrêmement tardive	Extrêmement longue	Extrêmement longue	Extrêmement longue
1,9 à 1,5	Très humide	Très tardive	Très tardive	Très longue	Très longue	Très longue
1,4 à 1,0	Modérément humide	Modérément tardive	Modérément tardive	Modérément longue	Modérément longue	Modérément longue
0,9 à -0,9	Proche de la normale	Proche de la normale	Proche de la normale	Proche de la normale	Proche de la normale	Proche de la normale
-1,0 à -1,4	Modérément sec	Modérément précoce	Modérément précoce	Modérément courte	Modérément courte	Modérément courte
-1,5 à -1,9	Très sec	Très précoce	Très précoce	Très courte	Très courte	Très courte
≤-2	Extrêmement sec	Extrêmement précoce	Extrêmement précoce	Extrêmement courte	Extrêmement courte	Extrêmement courte

## 2-11. Zone d'étude

Compte-tenu de la nature erratique des paramètres climatiques, l'idée d'un sahel-large a été retenue pour prendre en compte la zone soudanienne. Ainsi, la zone de l'étude est comprise entre les isohyètes 150 et 1200mm. Elle est subdivisée en zones (i) sahélo-saharienne (150 à 300 mm), (ii) sahélienne (300 à 600 mm), (iii) sahélo-soudanienne (600 à 800 mm) et (iv) soudanienne (800 à 1200 mm), [22]. Elle s'étend entre 12°W/17°E et 10°N/20°N (*Figure 1*).

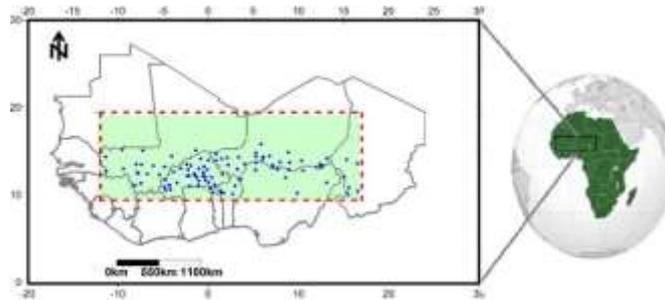


Figure 1 : Zone d'étude et répartition spatiale des stations

## 3. Résultats

### 3-1. Homogénéité et tendance des données observées

Le test Pettitt montre que les données analysées sont hétérogènes, avec des ruptures observées dans les séries au niveau de 52 % des stations pour les CPSa, contre 11 % des stations pour les DDSa, 34 % pour les DFSa, 30 % pour les LSa, 44 % pour les JPSa et 10 % pour les durées des SSa (*Tableau 2*). Les tendances des séries observées sont caractérisées par une pente de Sen négative sur 95 % de stations dont 44 % de significativité pour les CPSa (*Tableau 2*). Pour les DDSa, les tendances montrent une pente positive sur 66 % des stations dont seulement 8 % de significativité. Concernant les DFSa, la pente de Sen est négative sur 86 % des stations, avec toutefois une tendance significative sur 31 % des stations. S'agissant des LSa, elles montrent une tendance significative sur 27 % des stations avec une pente de Sen négative sur 86 % des stations. En fin, les durées SSa, seulement 6 % des stations présentent une tendance significative sur 21 % de négative et 17 % de positif.

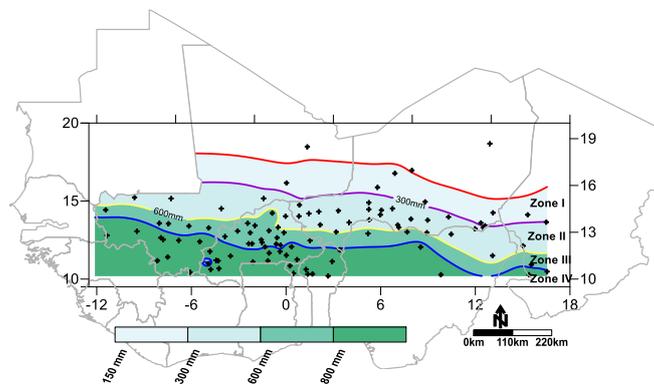
Tableau 2 : Homogénéité et tendances des séries de données

Dérivés pluviométriques caractérisant la saison agricole	Homogénéité des séries (Pettitt, $\rho = 99\%$ )		Tendances des données et significativité (Mann-Kendall, $\rho = 95\%$ )		
	Rupture	Sans rupture	Positive	Négative	Significative
CPSa	52 %	48 %	+5 %	-95 %	44 %
DDSa	11 %	89 %	+66 %	-25 %	8 %
DFSa	34 %	66 %	+3 %	-86 %	31 %
LSa	30 %	70 %	+10 %	-86 %	27 %
JPSa	44 %	66 %	+5 %	-91 %	19 %
SSa	10 %	90 %	+17 %	-21 %	6 %

### 3-2. Evolution spatio-temporelle des dérivées pluviométriques

#### 3-2-1. Evolution spatiale des CPSa

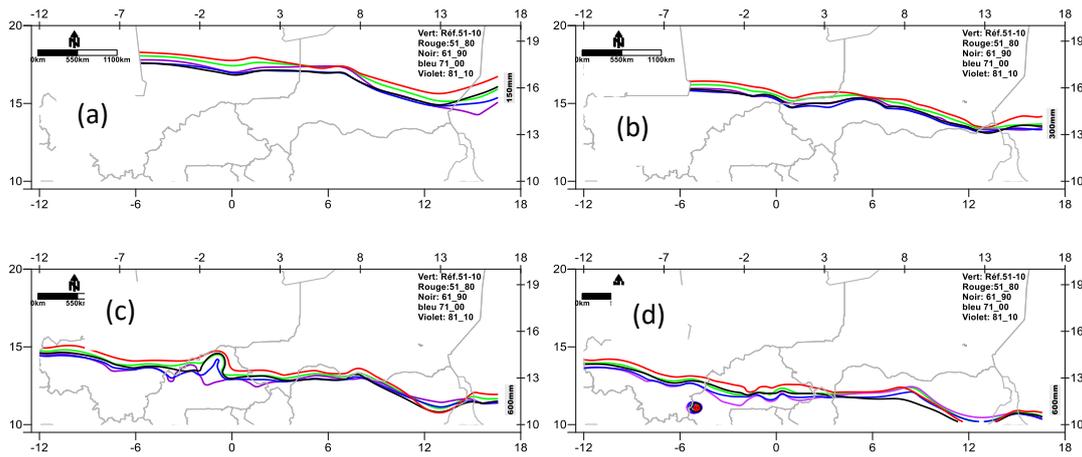
L'analyse de la pluviométrie en fonction des isohyètes permet de subdiviser la région d'étude en quatre zones (**Figure 2**). La Zone I (en marge du désert) couvre le Centre du Mali, du Niger et du Tchad et se limite au Sud entre 15,2°N (au Mali) et 14,2°N (au Tchad). La Zone II, s'étend également du Centre du Mali au centre du Tchad, en passant par l'extrême Nord Burkina Faso, la majeure partie de la bande agricole du Niger et l'extrême Nord du Nigeria. Elle se limite au Sud entre les latitudes 14,8°N (au Mali) et 11,8°N (au Tchad). La Zone III est limitée au Sud par les latitudes 13,1°N (au Mali) et 11,20°N (au Tchad). Elle traverse le Centre du Burkina Faso, l'extrême Sud-ouest Niger et le Nord Nigeria. Enfin la Zone IV couvre les parties Sud du Mali, du Burkina Faso, du Tchad, le Centre du Nigeria et les parties Nord des pays du Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Ghana, Togo et Benin).



**Figure 2 :** Evolution spatiale des CPSa sur le long terme (1951-2010) et zonage en fonction des isohyètes 150 mm (rouge), 300 mm (violet), 600 mm (jaune) et 800 mm (bleue)

L'évolution des isohyètes 150, 300, 600 et 800 mm sur les normales climatologiques 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000 et 1981-2010, comparées à la référence 1951-2010, montre que :

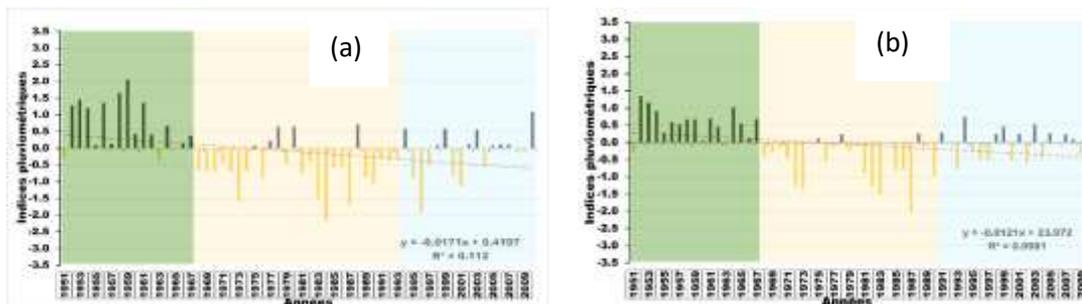
- L'isohyète 150 mm a reculé vers le Sud, de 31 à 51 km pendant toutes les normales à l'exception de celle de 1951-1980 durant laquelle, elle avait remonté de 40 km (**Figure 3a**) ;
- L'isohyète 300 mm a bougé en deçà de sa position de référence de 18 à 33 km pendant les trois dernières normales, mais avait remonté de 22 km sur la normale 1951-1980 (**Figure 3b**) ;
- L'isohyète 600 mm s'est aussi retiré de 18 à 26 km pendant les mêmes trois dernières normales, après avoir connu une remontée de 18 km pendant la normale 1951-1980 (**Figure 3c**) ;
- L'isohyète 800 mm a connu des fluctuations, avec un retrait vers le Sud de 9 à 28 km, notamment pendant les normales 1971-2000 et 1981-2010. Sur la normale 1951-1980, elle est restée proche de la référence 1951-2010, avec une légère remontée de 5 km (**Figure 3d**).

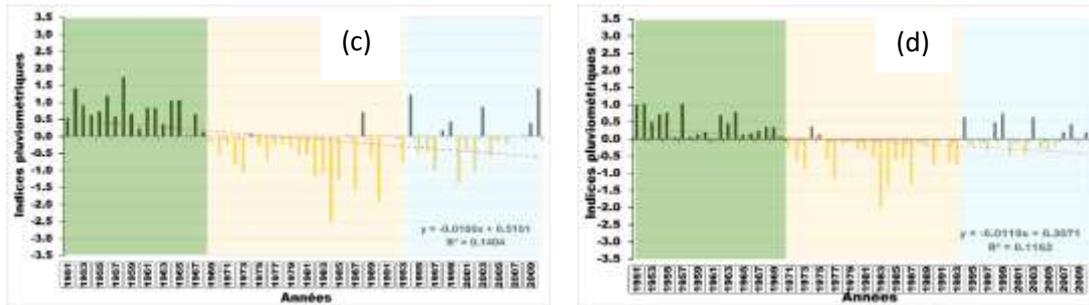


**Figure 3 :** Evolution spatio-temporelle des isohyètes pluviométriques 150 mm (a) 300 mm (b), 600 mm (c) et 800 mm (d) sur les normales 1951-1980 (rouge), 1961-1990 (noir), 1971-2000 (bleu), 1981-2010 (violet) et le long-terme 1951-2010 (Vert)

### 3-2-2. Evolution temporelle des cumuls pluviométriques

Dans la Zone I, les indices pluviométriques indiquent une tendance à la baisse de la pluviométrie dans la partie Nord du Sahel-central (**Figure 4a**). Cependant, sur la période 1951-2010 cette tendance à la baisse des pluies est non significative ( $R^2 = 0,112$ ). L'évolution globale de la pluviométrie est marquée par une phase humide qui va de 1951 à 1968, une phase sèche allant de 1969 à 1983 et une phase caractérisée par une alternance d'années humides et sèches, entre 1984 et 2010. La première moitié de la normale climatologique 1951-1980 a été humide et la deuxième a été sèche. La situation de sécheresse a persisté sur les normales 1961-1990, 1971-2000 et le début de 1981-2010. Dans la Zone II, la tendance globale à la baisse de la pluviométrie est très significative ( $R^2 = 0,0078$ ), avec une phase humide observée entre 1951 et 1967, une phase sèche entre 1968 et 1990 et une phase plus contrastée entre 1988 et 2010 (**Figure 4b**). Les tendances de l'évolution par normale climatologique sont similaires à celles de la Zone I. Dans de la Zone III, la même tendance globale à la baisse des pluies est observée, mais elle est moins significative ( $R^2 = 0,14$ ). Dans cette zone, la phase humide a concerné la période 1951 à 1968, celle sèche s'est étendue de 1969 à 1983 (**Figure 4c**). La période 1984-2010 a été marquée par une alternance d'années humides et sèches, comme dans les Zones I et II. Aussi, les normales climatologiques 1961-1990, 1971-2000 et 1981-2010 montrent les mêmes allures pluviométriques que dans les Zones I et II. La Zone IV montre aussi une tendance globale à la baisse des pluies significative ( $R^2 = 0,014$ ), avec les mêmes phases humide (1951-1970), sèche (1971-1983) et contrastée (1984-2010). Sur les autres normales climatologiques, l'évolution pluviométrique reste similaire à celles des autres zones (**Figure 4d**).

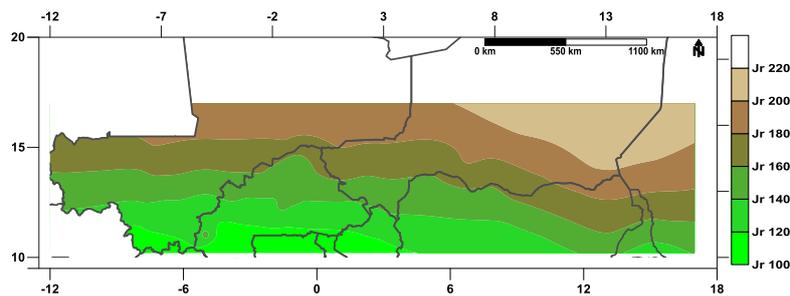




**Figure 4 :** Evolution des Indices (en barres verticales) et tendance globale (ligne en pointillés rouges) de pluviométrie annuelle dans les Zones I (a), II (b), III (c) et IV (d) de l'étude

**3-2-3. Evolution des dates de début de saison agricole**

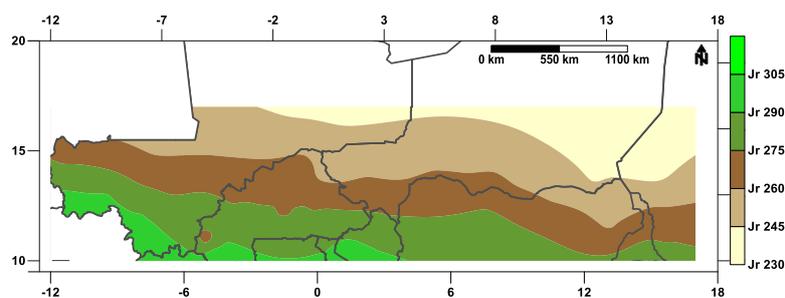
Dans l'ensemble, la DDSa s'observe plus tôt dans la partie Sud de la zone d'étude, pour s'étendre graduellement aux latitudes supérieures. Dans la Zone I, la saison agricole débute en moyenne autour du 196<sup>ème</sup> jour julien (JJ) ou le 15 juillet (avec un écart-type de 6 jours), sur la période 1951-2010 (**Figure 5**). Dans la Zone II, elle débute vers le 171<sup>ème</sup> JJ ou le 20 juin  $\pm$  10 jours, contre le 146<sup>ème</sup> JJ ou le 26 mai  $\pm$  9 dans la Zone III et, le 125<sup>ème</sup> JJ ou le 5 mai  $\pm$  13 jours dans la zone IV. Bien que variables d'une année à l'autre, les DDSa montrent une légère tendance à la tardiveté, notamment dans les Zones III et IV.



**Figure 5 :** Evolution spatiale des DDSa sur la période 1951-2010

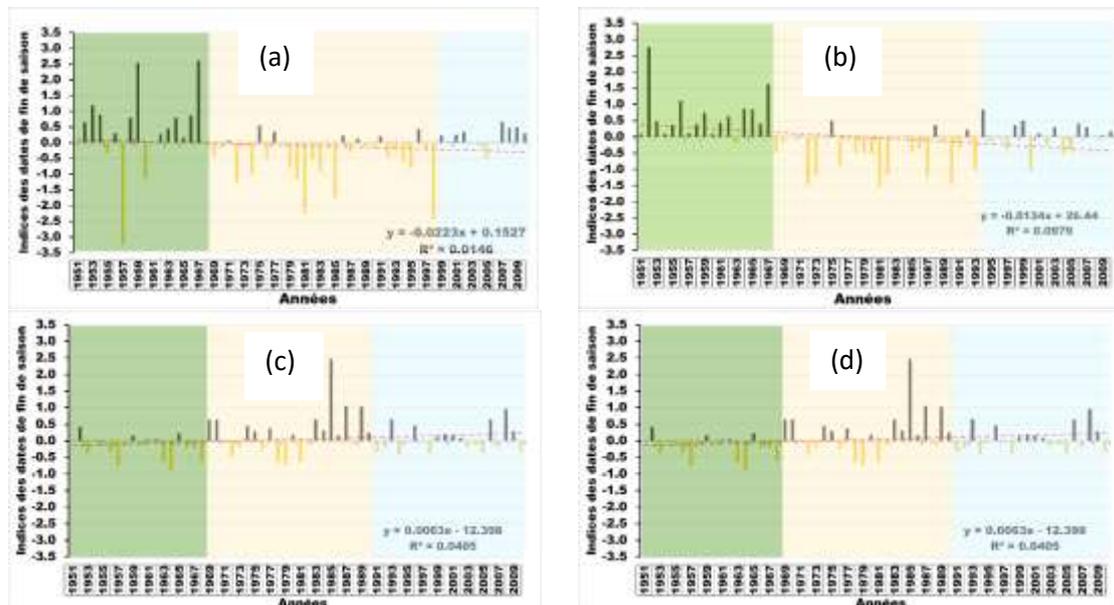
**3-2-4. Evolution des dates de fin de saison agricole**

Dans la Zone I, la DFSa moyenne est le 250<sup>ème</sup> JJ ou le 7 septembre ( $\pm$  1 jour), sur la période 1951-2010 (**Figure 6**). Dans la Zone II, elle intervient le 258<sup>ème</sup> JJ ou le 15 septembre ( $\pm$  5 jours), contre le 272<sup>ème</sup> JJ ou le 29 septembre ( $\pm$  4 jours), dans la Zone et le 286<sup>ème</sup> JJ ou le 13 octobre ( $\pm$  6 jours), dans la Zone IV.



**Figure 6 :** Evolution spatiale des DFSa sur la période 1951-2010

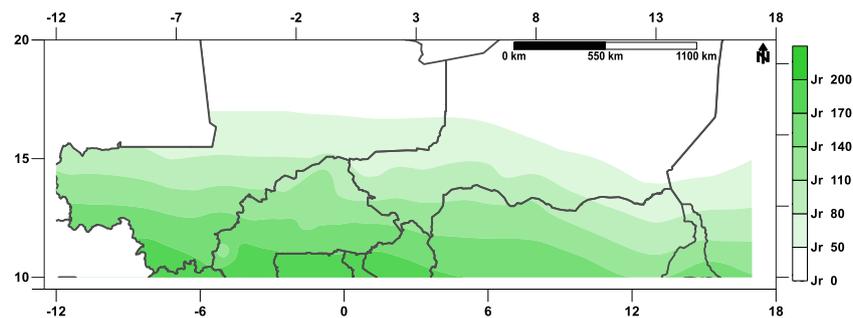
Les DFSa ont tendance à être précoces dans les Zones I, II et IV (*Figures 7a, b, et d*) et tardives dans la Zone III (*Figure 7c*). Dans les Zones I, II et IV, elles ont été particulièrement tardives sur la période 1951-1967 (1951-1969 dans la Zone IV). Elles ont été précoces entre 1968 et 1987, dans la Zone I et entre 1969 et 1993, dans les Zones II et IV avant d'être à nouveau tardives entre 1987 et 2010.



**Figure 7 :** Evolution des indices (en barres verticales) et tendance globale (ligne en pointillés rouge) des DFSa dans les Zones I(a), II(b), III(c) et IV(d)

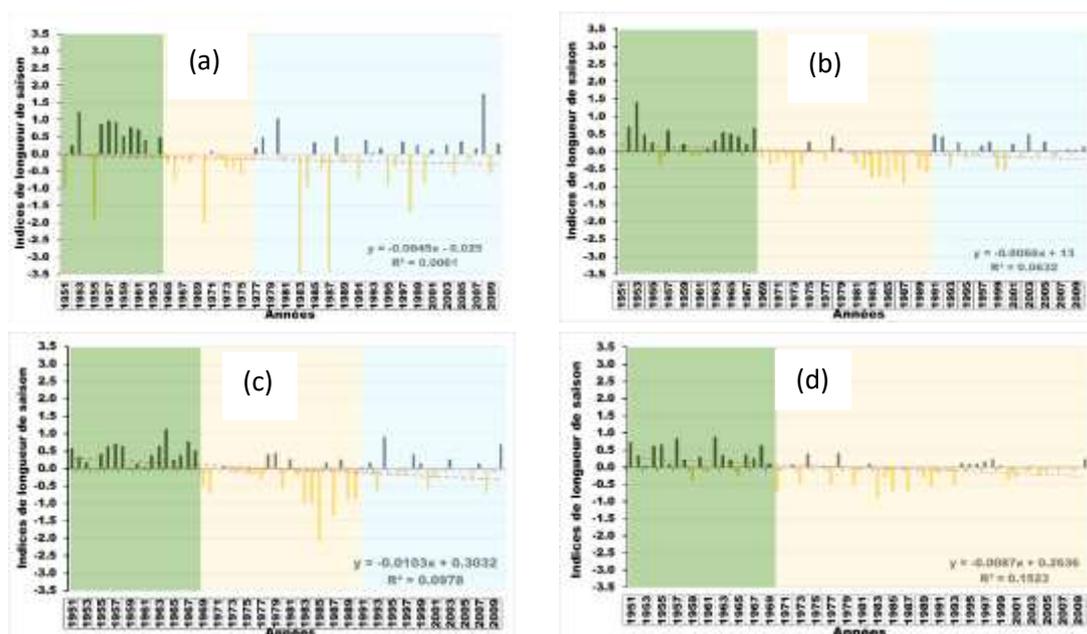
### 3-2-5. Evolution des longueurs de saison agricole

Dans la zone d'étude, la LSA augmente graduellement du Nord vers le Sud, avec une moyenne de  $54 \pm 7$  jours dans la Zone I, de  $88 \pm 14$  jours dans la Zone II, de  $126 \pm 12$  jours dans la Zone III et de  $161 \pm 17$  jours dans la Zone IV (*Figure 8*).



**Figure 8 :** Evolution spatiale des longueurs de saison moyennes sur le long-terme (1951-2010)

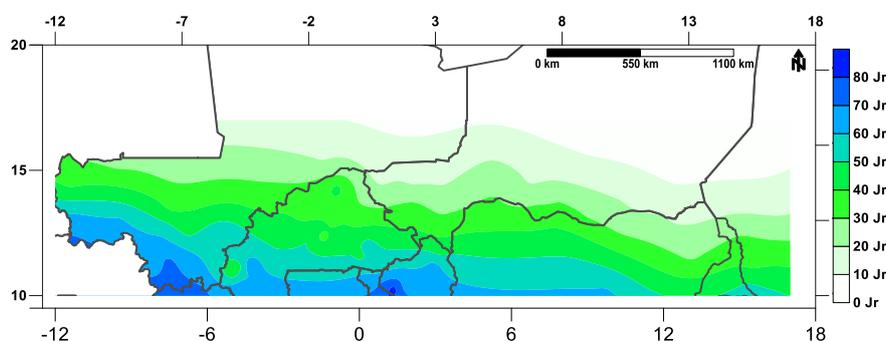
La LSA s'est raccourci dans toutes les quatre zones, avec une tendance plus significative dans la Zone I ( $R^2 = 0,0061$ ) que dans les Zones II ( $R^2 = 0,0632$ ), III ( $R^2 = 0,0978$ ) et IV ( $R^2 = 0,1523$ ). L'évolution des indices de la LSA présente trois phases dans les Zones I, II et III (*Figure 9a, b, et c*) et deux dans la Zone IV (*Figure 9d*). Relativement plus longue pendant la première phase couvrant les 14 à 18 premières années selon les Zones, la LSA a entamé un raccourcissement marqué à partir de 1965 dans la Zone I, de 1969 dans les Zones II et III et de 1970 dans la Zone IV. La deuxième phase se caractérise par des LSA plus courtes dans les quatre Zones et la troisième par des LSA tantôt plus courtes, tantôt plus longues selon les années, dans les Zones I, II et III.



**Figure 9 :** Evolution des indices (en barres verticales) et tendance globale (ligne en pointillés rouges) de la LSa dans les Zones I(a), II(b), III(c) et IV(d)

**3-2-6. Evolution des nombres de jours de pluies de la saison agricole**

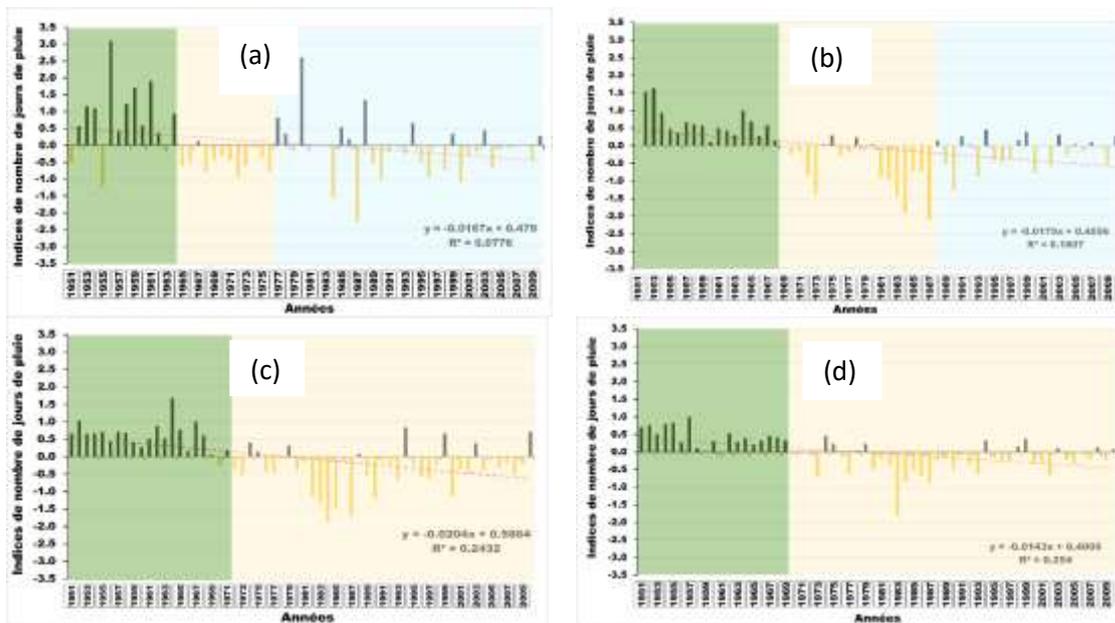
Le JPSa varie selon les zones et les saisons. Dans la Zone I, le JPSa est de  $13 \pm 2$  jours, contre  $26 \pm 5$  jours dans la Zone II,  $41 \pm 4$  jours dans la Zone III et  $58 \pm 9$  jours dans la Zone IV (Figure 10).



**Figure 10 :** Evolution des JPSa sur la période 1951-2010

L'évolution des indices montre que le JPSa est en diminution dans toutes les zones. Cette diminution statistiquement non significative est plus marquée dans la Zone I ( $R^2 = 0,078$ ) que dans les Zones II ( $R^2 = 0,181$ ), III ( $R^2 = 0,243$ ) et IV ( $R^2 = 0,254$ ), sur la période 1951-2010 (Figure 11). Dans la Zone I, l'évolution des indices de JPSa laisse remarquer trois phases, avec des JPSa plus élevés sur la période 1951-1964, plus faibles entre 1965 et 1976 et assez contrastés de 1977 à 2010 (Figure 11a). Dans la Zone II, c'est pratiquement la même configuration qui s'observe, avec toutefois des JPSa maintenus plus élevés sur la période 1951-1968, plus faibles entre 1969 et 1988 et également contrastés entre 1989 et 2010 (Figure 11b). Dans les Zones III et IV, les JPSa sont restés plus élevés jusqu'entour de 1970, avant d'entamer une phase de diminution quasi-constante jusqu'en 2010, avec les années 1981-1991 ayant eu les indices les plus négatifs (Figures 11c et d). Les mêmes tendances sont globalement observées selon les zones sur les normales

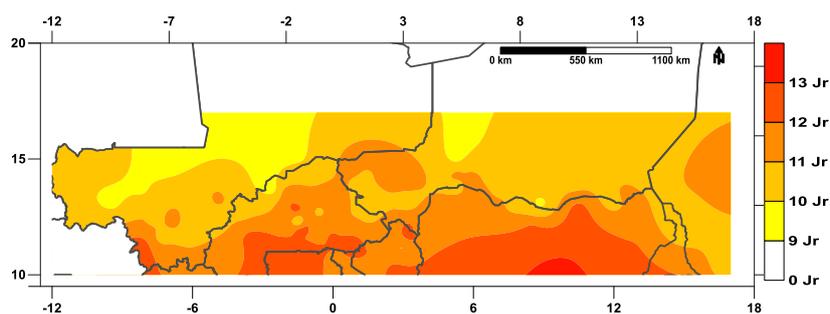
climatologiques 1951-1980, 1961-1990 et 1971-2000, avec une variabilité du JPSa moins marqué dans les Zones II et III et dominée par une alternance d'années JPSa positifs et négatifs, notamment sur les normales 1961-1990, 1971-2000 et 1981-2010.



**Figure 11 :** Evolution des indices (en barres verticales) et tendance (ligne en pointillés rouges) des JPSa dans les Zones I(a), II(b), III(c) et IV(d)

### 3-2-7. Evolution des longueurs des séquences sèches

La SSa, varie entre 9 et 13 jours, dans la zone de l'étude. Elle est plus longue dans la partie Sud de la zone d'étude (Zone IV). Dans les Zones I, II, et III, la SSa est en moyenne de  $11 \pm 1$  jour, contre  $12 \pm 1$  jours dans la Zone IV (Figure 12).



**Figure 12 :** Evolution spatiale de la SSa sur la période 1951-2010

Les indices d'évolution temporelle des SSa montrent une tendance mitigée dans toutes les zones, avec des coefficients de détermination très faibles (Figures 13). La variabilité est très grande d'une année à l'autre et aucune phase temporelle claire ne peut être identifiée. La tendance globale est marquée par une alternance de SSa plus courtes et plus longues, par rapport aux moyennes climatologiques prises comme références (1951-2010, 1951-1980, 1961-1990 et 1971-2000 et 1981-2010), avec des amplitudes plus grandes dans la Zone I.

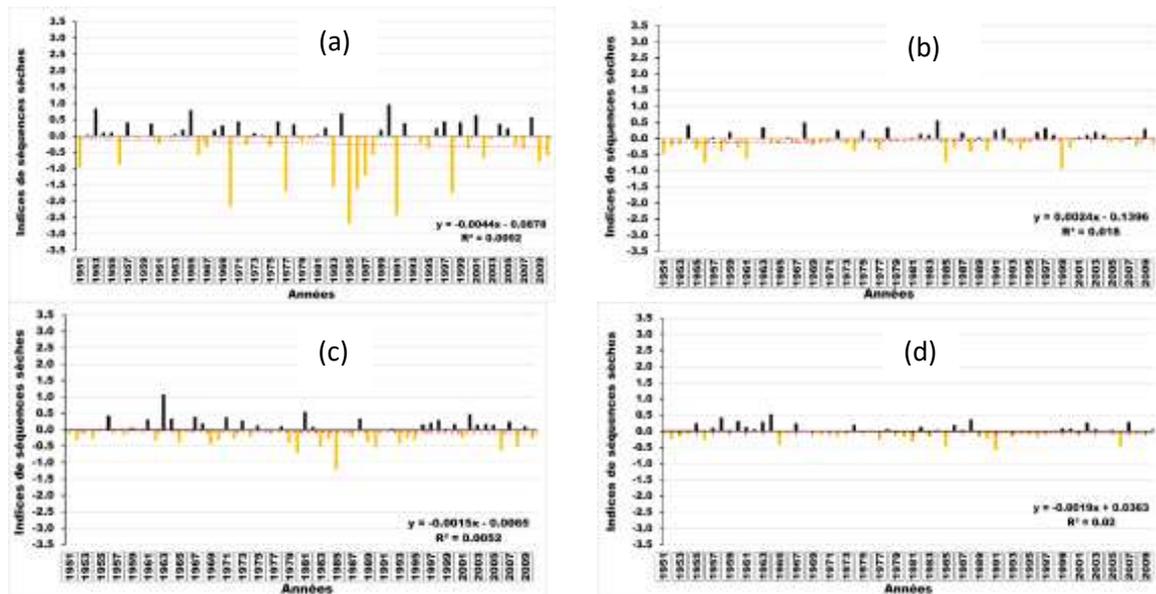


Figure 13 : Evolution des indices (en barres verticales) et tendance globale (ligne en pointillés rouges) de SSA dans les Zones I(a), II(b), III(c) et IV(d)

### 3-3. Caractérisation des dérivés pluviométriques

La caractérisation des dérivés pluviométriques par zone révèle un CPSa moyen de  $201 \pm 32$  mm dans la Zone I, contre  $384 \pm 84$  mm dans la Zone II,  $643 \pm 65$  mm dans la Zone III et  $943 \pm 128$  mm dans la Zone IV (**Tableau 3**). Plus de 60 % des CPSa sont enregistrés entre juillet et septembre et près de 80 % entre les DDSa et les DFSa, au niveau de toutes les stations de la zone d'étude. Dans la zone IV, 60 à 80 % des pluies sont enregistrées pendant cette période, contre 70 à 90 % dans les zones III et II et 90 à 100 % dans la zone I. La fréquence des CPSa extrêmes est aussi variable en fonction des zones. Par exemple, dans la Zone I, il est possible d'observer des années extrêmement humides à une fréquence de 1/20 ans et des années extrêmement sèches à une fréquence de 1/12 ans (**Tableau 3**). Dans les Zones II et III, la fréquence des années sèches est respectivement de 1/30 ans et 1/60 ans. Les années modérément sèches sont plus fréquentes (1/9 ans dans la Zone I, contre 1/20 ans dans les Zones II et IV et 1/12 ans dans la Zone III).

Tableau 3 : Caractérisation des cumuls pluviométriques dans les différentes zones

CPSa	Indices	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
	Cumul	$201 \pm 32$ mm	$384 \pm 84$ mm	$643 \pm 65$ mm	$943 \pm 128$ mm
	Fréquence de pluies en JAS	80 à 100 %	70 à 90 %	70 à 90 %	60 à 80 %
	Fréquence de pluies entre DDSa et DFSa	79 %	84 %	92 %	95 %
	Tendance	A la baisse	A la baisse	A la baisse	A la baisse
	Phases	3 phases	3 phases	3 phases	3 phases
	<b>Fréquence</b>				
	Extrêmement humide	1/20			
	Très humide	1/20		1/60	
	Modérément humide	1/20	1/20	1/10	1/30
Proche de la normale	3/5	5/6	3/4	9/10	
Modérément sec	1/9	1/20	1/12	1/20	
Très sec	1/20	1/60		1/60	
Extrêmement sec	1/12	1/30	1/60		

La DDSa s'observe dès le 05 mai ( $\pm 06$  jours) dans la Zone IV, contre le 26 mai  $\pm 9$  jours dans la Zone III, le 20 juin  $\pm 10$  jours dans la Zone II et le 15 juillet ( $\pm 6$  jours) dans la Zone I (**Tableau 4**). Elle est très variable entre et dans les zones, avec une tendance à la précocité (sauf dans la zone III où elle tend à être tardive) tout en restant globalement proche de la normale à une fréquence de 5/6 ans. Les extrêmes les plus tardifs surviennent une fois chaque 20 ans dans la Zone I et une fois chaque 60 ans dans la Zone III.

**Tableau 4 : Caractérisation des dates de début de saison agricole dans les différentes zones**

DDSa	Indices	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
	Début	15 juillet $\pm 6$ jours	20 juin $\pm 10$ jours	26 mai $\pm 9$ jours	5 mai $\pm 13$ jours
	Variabilité	Forte	Forte	Forte	Forte
	Tendance	A la précocité	A la précocité	A la tardivité	A la précocité
	Fréquence				
	Extrêmement tardive	1/20		1/60	
	Très tardive				
	Modérément tardive	1/12	2/30	1/30	
	Proche de la normale	5/6	5/6	5/6	1/1
	Modérément précoce	1/20			1/60
Très précoce	1/60	1/60			
Extrêmement précoce					

Les DFSa sont observée entre le 07 septembre (Zone I) et le 13 octobre (Zone IV). Elles sont très variables, avec une tendance à la précocité dans les Zones I, II et IV et à la tardivité dans le Zone III (**Tableau 5**). Elles sont aussi proches de la normale à une fréquence de 5/6 ans. Les DFSa extrêmement précoces surviennent une fois chaque 30 ans dans les Zones I et II, contre une fois chaque 20 ans dans la Zone I.

**Tableau 5 : Caractérisation des dates de fin de saison agricole dans les différentes zones**

DFSa	Indices	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
	Fin	7 septembre $\pm 14$ jours	15 septembre $\pm 5$ jours	29 septembre $\pm 4$ jours	13 octobre $\pm 6$ jours
	Tendance	A la précocité	A la précocité	A la tardivité	A la précocité
	Phases	3 phases	3 phases	2 phases	3 phases
	Fréquence				
	Extrêmement tardive	1/30	1/60	1/60	1/60
	Très tardive		1/60		
	Modérément tardive		1/60	1/30	1/60
	Proche de la normale	5/6	5/6	5/6	5/6
	Modérément précoce	1/20	1/10		1/60
Très précoce	1/30	1/30			
Extrêmement précoce	1/20				

Les LSa varient selon les zones de  $54 \pm 7$  jours (Zone I) à  $161 \pm 17$  jours (Zone IV), avec une tendance globale à la diminution laissant constater 03 phases dans les Zones I, II et III et 02 phases dans le Zone IV (**Tableau 6**). Les LSa sont globalement proche de la normale et, les saisons modérément courtes s'observent une fois chaque 60 ans dans les Zones II et III. Celles courtes s'observent une fois chaque 20 ans dans la Zone I. Les LSa extrêmement courtes sont observées une fois chaque 30 ans dans les Zones I et une fois chaque 60 ans dans la Zone III.

**Tableau 6 :** Caractérisation des longueurs de saison agricole dans les différentes zones

LSa	Indices	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
	Longueur	54 ± 7 jours	88 ± 14 jours	126 ± 12 jours	161 ± 17 jours
	Tendance	A la diminution	A la diminution	A la diminution	A la diminution
	Phases	3 phases	3 phases	3 phases	2 phases
	Fréquence				
	Extrêmement longue				
	Très longue	1/60			
	Modérément longue	1/30	1/60	1/60	
	Proche de la normale	5/6	1/1	1/1	1/1
	Modérément courte		1/60	1/60	
	Très courte	1/20			
	Extrêmement courte	1/30		1/60	

Les JPSa oscillent entre 13 ± 2 jours dans la Zone I et 58 ± 9 jours dans la Zone IV. Ils ont une tendance globale à la diminution dans toutes les zones et ils montrent 3 phases pour les Zone I et II et 2 phases dans la Zone III et IV (*Tableau 7*). Ils sont proches de la normale 5 ans sur 6, mais ils montrent des valeurs extrêmement courtes qui surviennent une fois chaque 60 ans notamment dans les Zones I et II.

**Tableau 7 :** Caractérisation des nombres de jours de pluies de saison agricole dans les différentes zones

JPSa	Indices	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
	Nombre de jours	13 ± 2 jours	26 ± 5 jours	41 ± 4 jours	58 ± 9 jours
	Tendance	A la diminution	A la diminution	A la diminution	A la diminution
	Phases	3 phases	3 phases	2 phases	2 phases
	Fréquence				
	Extrêmement grand	1/30			
	Très grand	1/30	1/30	1/60	
	Modérément grand	1/15		1/30	1/60
	Proche de la normale	5/6	5/6	5/6	1/1
	Modérément petit	1/20	1/20	1/15	
	Très petit		1/60	1/20	1/60
	Extrêmement petit	1/60	1/60		

Les SSa atteignent en moyenne 11 à 12 jours selon les zones. Bien que très variables selon les années et les zones, elles ont une tendance au raccourcissement dans les Zones I, III et IV (*Tableau 8*) et à la prolongation dans la Zone II, tout en restant très proche de la normale (5ans sur 6). Les SSa extrêmement courtes s'observent un an sur 20 dans la Zone I et celles modérément longue un an sur 60 dans la Zone III.

**Tableau 8 : Caractérisation des longueurs des séquences sèches pendant la saison agricole dans les différentes zones**

SSa	Indices	Zone I	Zone II	Zone III	Zone IV
	Nombre de jours	11 ± 1 jours	11 ± 1 jours	11 ± 1 jours	12 ± 1 jours
	Variabilité	Très variable	Très variable	Très variable	Très variable
	Tendance	A la diminution	A l'augmentation	A la diminution	A la diminution
	<b>Fréquence</b>				
	Extrêmement longue				
	Très longue				
	Modérément longue			1/60	
	Proche de la normale	5/6	1/1	1/1	1/1
	Modérément courte	1/60		1/60	
Très courte	1/15				
Extrêmement courte	1/20				

## 4. Discussion

### 4-1. Cumuls pluviométriques

L'évolution spatiale de la pluviométrie dans l'espace d'étude permet d'identifier quatre zones distinctes [22] dont la première est située entre les isohyètes 150 et 300 mm, la deuxième entre 300 et 600 mm, la troisième entre 600 et 800 mm et la quatrième de 800 mm à plus. Dans ces zones, les cumuls pluviométriques ont une tendance à la baisse pouvant s'expliquer par la réduction de la longueur de la saison des pluies et du nombre de jours pluvieux, [23]. Malgré les disparités entre les différentes zones, plus de 60 % des pluies sont enregistrées entre juillet et septembre, avec des quantités plus importantes dans les zones Sud. Dans la Zone IV, il y a une plus grande possibilité d'obtenir des pluies avant et après la période de juillet-août-septembre, pendant laquelle seulement 60 à 80 % des pluies sont enregistrées. Dans les Zones II et III, 70 à 90 % des pluies tombent entre juillet et septembre, contre 90 à 100 % dans la Zone I où les précipitations sont plus concentrées sur ces trois mois ou même sur deux mois, le plus souvent. Ceci concorde avec les résultats de [24] ayant indiqué qu'en Afrique de l'Ouest la pluviométrie décroît avec la latitude. Cette tendance est confirmée par la descente des isohyètes (de 20 à 60 km) vers le Sud sur la période 1951-2010. Toutefois, au cours de la normale 1981-2010, les isohyètes 150 et 300 mm ont eu une position plus élevée que celles qu'elles ont occupées pendant les périodes 1971-2000 et 1961-1990, au Centre de la zone d'étude. Ceci indique une certaine amélioration de la pluviométrie dans le Sahel liée notamment à une augmentation des événements de fortes pluies [25]. Dans toutes les zones, après la première phase humide des années 1951 à 1969 et la deuxième phase sèche d'à partir de 1970, la dernière période (des années 1990 à 2010) est caractérisée par une forte alternance d'années humides et sèches, avec une certaine tendance à un retour à des conditions humides au Sahel [22, 26]. Cette alternance d'années humides et sèches est d'ailleurs plus importante dans la Zone I qui enregistre presque 100 % des pluies qu'elle reçoit entre juillet et septembre.

### 4-2. Dates de début et de fin de saison agricole

Les DDSa et DFSa varient en fonction de la latitude. La saison s'installe plutôt dans la Zone IV (5 mai) que dans la Zone I (15 juillet), en respectant un gradient Sud-Nord bien clair. La tendance inverse est observée pour la

fin de la saison qui intervient vers le 7 septembre dans la Zone I et le 13 octobre dans la Zone IV. Ces deux paramètres de la saison agricole sont intimement liés aux positionnements du Front intertropical liés à l'interaction entre les vents de mousson et d'harmatan au sol et à la mise en place ou au retrait des conditions de la mousson ouest africaine, en altitude. Les DDSa et DFSa sont aussi variables d'une année à l'autre avec des extrêmes plus marqués dans les Zones I, II et III. Aussi, comme l'a remarqué [27] au Sénégal, la variabilité des DDSa est plus forte que celle des DFSa. Les tendances à la tardiveté de la DDSa et à la précocité de la DFSa constituent un défi majeur pour la conduite des activités agricoles, notamment dans les Zone I et II où la croissance des cultures pluviales est particulièrement plus exposée aux déficits pluviométriques plus fréquents en début et vers la fin de la saison des pluies. Les projections faites indiquent que les saisons des pluies commenceraient encore plus tardivement en Afrique de l'Ouest dans les décennies à venir, au moment où les précipitations seraient plus intenses [29]. Aussi, des études d'impact du changement climatique sur les rendements céréaliers (présents et futurs) prévoient un impact plus fort du réchauffement climatique et du démarrage tardif des pluies, dans le Sahel Ouest que dans le Sahel Centre (Niger et Burkina Faso).

#### 4-3. Longueur de saison agricole

La LSa est en moyenne de 54 jours (~2 mois) dans la Zone I, de 88 jours (~3 mois) dans la Zone II, de 126 jours (~4,5 mois) dans la Zone III et de 161 jours (~5,5 mois) dans la Zone IV. Cette configuration est en phase avec le mécanisme de la mousson ouest africain [28], qui s'installe progressivement du Sud vers le Nord et se retire graduellement dans le sens inverse en fonction des latitudes, donc des quatre zones climatiques définies dans le cadre de cette étude. Elle varie dans le temps et à l'intérieur des zones et se caractérise globalement par une alternance d'années à LSa longues et courtes. La LSa est étroitement liée aux DDSa et DFSa et elle devient particulièrement plus courte en cas de DDSa tardive et de DFSa précoce. Dans ce sens, [25] stipule que le Sahel-central connaît une diminution de la durée de la mousson agronomique. Malgré des comportements très variables dans les variations spatiales des indices climatiques, les tendances détectées pour la LSa indiquent majoritairement une réduction [30, 31]. Cette situation constitue un problème crucial pour les cultures pluviales, notamment dans la zone sahélienne où le plus souvent elles n'arrivent pas à boucler correctement leurs cycles de croissance, du fait du raccourcissement de la LSa.

#### 4-4. Nombre de jours de pluies

Le gradient Nord-Sud des JPSa est très marqué au Sahel-central, avec une variation latitudinale allant de  $58 \pm 9$  jours (au Sud) à  $13 \pm 2$  jours (au Nord). Le JPSa pourrait être intimement lié à la longueur de la saison qui dépend elle aussi des DDSa et des DFSa. Un raccourcissement des saisons agricoles pourrait donc se traduire par la réduction des JPSa, telle que de plus en plus observée ces dernières années. En effet, la région ouest-africaine est caractérisée par une variabilité très marquée des JPSa qui passent d'un nombre plus élevé avant les années 1960 (dans toutes les zones) à un nombre plus réduit pendant les années 1970 et 1980 puis très fluctuant d'une année à l'autre sur les dernières décennies. Ce qui est contraire aux analyses contradictoires de [32] qui stipule que pendant les 10 dernières années, le régime des précipitations sahéliennes est caractérisé par une importante réduction des JPSa et, de [33] qui imputent le retour des conditions humides, depuis la fin des années 1990 dans certaines zones du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest, aux fortes intensités pluviométriques et à une tendance à l'augmentation des jours pluvieux.

#### 4-5. Longueur des séquences sèches

La durée maximale des SSa, ou encore le nombre de jours consécutifs sans pluie, est variable selon les zones. Dans le cadre de cette étude, les SSa estimées sont apparues plus longues dans les zones Sud que dans celles

Nord, parce qu'elles ont été calculées sur la longueur de la saison agricole (entre la DDSa et la DFSa), au niveau de chaque station. Or, la saison agricole est très courte au Nord, notamment dans la Zone I où elle démarre tardivement vers le 15 juillet et finit tôt vers le 07 septembre ; soit une LSa approximative de 1,5 mois à l'intérieur de laquelle les durées des SSa sont circonscrites. De ce fait, lorsqu'elles surviennent dans ces zones Nord, les SSa les plus longues correspondent souvent à la fin de la saison des pluies ; ce qui montre qu'elles peuvent être tronquées par les critères de calcul limitant les jours considérés secs à la DFSa. En revanche, dans les zones plus au Sud où la saison commence tôt et finit tardivement, les séquences sèches intra saisonnières sont plus longues, du fait de l'étendue de la saison et des faux départs [34]. A l'échelle inter-saisonnière, les durées SSa ont une tendance à la hausse, sauf dans la Zone I où elles sont plutôt en baisse, contrairement aux résultats obtenus par [35]. Cependant, les extrêmes de SSa sont plus intenses dans la zone Nord en marge du désert où la croissance des cultures est souvent plus affectée par l'occurrence des séquences sèches [16, 36].

#### **4-6. Caractérisation de la saison agricole**

Les Zones I et II sont celles où l'agriculture est plus exposée aux impacts du climat. Dans ces deux zones, les DPCSa indiquent des fréquences élevées de périodes sèches, de DDSa tardives et de DFSa précoces. On y note une forte fréquence d'années avec des LSa courtes et des nombres JPSa faibles ( $\leq 30$  jours). Quant aux Zones III et IV, elles sont plus stables, avec une occurrence des DPCSa généralement proche de la moyenne. Les LSa et le nombre de JPSa y sont aussi plus grands. L'évolution pluviométrique annuelle indique une baisse dans toute les zones, avec près de 200 mm de déficit observé entre 1970 et 1990 au Sahel [16], soit une baisse de -50 à -60 % dans la Zone I. Cette situation est souvent à la base d'insécurité alimentaire entraînant le déplacement des populations des zones Nord vers le Sud (plus humide) et les grandes villes.

### **5. Conclusion**

L'analyse de la répartition de la pluviométrie annuelle a permis d'identifier quatre zones au Sahel et en Afrique de l'Ouest où les dérivés pluviométriques qui impactent l'agriculture sont surtout les cumuls pluviométriques de la saison agricole (CPSa), les dates de début de la saison agricole (DDSa), les dates de fin de la saison agricole (DFSa), la longueur de la saison agricole (LSa), les séquences sèches dans la saison agricole (SSa) et le nombre de jours de pluie pendant la saison agricole (JPSa). L'analyse de la pluviométrie sur le long-terme et comparé à la période de référence 1951-2010, indique une migration des isohyètes sur les trois dernières normales de 10 à 50 km vers le Sud. Mais, comparé aux autres normales, les isohyètes de la normale 1981-2010 ont connu une légère remontée par endroit. Dans toutes les zones les dérivés pluviométriques caractérisant la saison agricole (DPCSa) sont très variables d'une année à l'autre et d'une station à l'autre. Leurs évolutions spatio-temporelles montrent des fortes variabilités latitudinales avec des gradients Nord-Sud assez marqués. Les tendances globales montrent des CPSa qui sont à la baisse, des DDSa globalement précoces (sauf dans la Zone II), des DFSa globalement précoces (sauf dans la Zone III), des LSa et JPSa à la baisse, et des durées SSa variables en fonction des zones. Les fréquences ou temps de retour des situations extrêmes des DPCSa sont très variables et peuvent impacter les activités socioéconomiques dans la zone de l'étude.

## Références

- [1] - M. V. K. SIVAKUMAR, A. MAIDOUKIA and R. D. STERN, "Agroclimatology of West Africa: Niger", (Second Edition), Information Bulletin No. 5, ICRISAT, Patancheru, India, (1993) 108 p.
- [2] - A. JALLOH, G. C. NELSON, T. S. THOMAS, R. ZOUGMORÉ, H. ROY-MACAULEY, "Overview in West African agriculture and climate change: A comprehensive analysis". Research Monograph. International Food Institute, (2013) 1 - 15.  
<http://ebrary.ifpri.org/utills/getfile/collection/p15738coll2/id/127444/filename/127655.pdf>
- [3] - B. SARR, L. KAFAND, et S. ATTA, "Identification des risques climatiques de la culture du maïs au Burkina Faso", *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5(4), (2011), 1659 - 1675  
<https://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/viewFile/75932/66427>
- [4] - P. CAMBERLIN, M. DIOP, "Application of daily rainfall PCA to the assessment of the rainy season characteristics in Senegal", *Accepté dans Climate Research* (2002)
- [5] - J. B. OMOTOSHO, "Long-range prediction of the onset and end of the rainy season in the West African Sahel", *Int. J. Climatol.* 12, (1992), 369 - 382
- [6] - J. B. OMOTOSHO, A. A. BALOGUN, K. OGUNJOBI, "Predicting monthly and seasonal rainfall, onset and cessation of the rainy season in West Africa using only surface data", *Int. J. Climatol.* 20, (2000) 865 - 880
- [7] - D. DODD, I. T. JOLLIFFE, "Early detection of the start of the wet season in semi-arid tropical climates of western Africa", *Int J Climatol.* 21, (2001) 1251-1262, doi : <https://doi.org/10.3406/ingeo.1952.1159>
- [8] - P. OZER and M. ERPICUM, "Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905", *Sécheresse*, 6, (1995) 103 - 108
- [9] - M. BALME, S. GALLE, T. LEBEL, "Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, analysée à partir des données EPSAT-Niger", Article de recherche, *Sécheresse*, vol. 16, n° 1, (2005)
- [10] - J. O. ADEJUWON, E. E. BALOGUN, S. A. ADEJUWON, "On the annual and seasonal patterns of rainfall fluctuations in sub-Saharan West Africa", *International Journal of Climatology* 10, (1992) 839 - 848
- [11] - T. O. ODEKUNLE, E. E. BALOGUN AND O. O. OGUNKOYA, "On the prediction of rainfall onset and retreat dates in Nigeria", *Theor. Appl. Climatol.* 81, (2004) 101 - 112
- [12] - K. H. COOK, AND E. K. VIZY, "Impact of climate change on mid-twenty-first century growing seasons in Africa", *Climate Dyn.* 39, (2012) 2937 - 2955
- [13] - J. B. OMOTOSHO, "Synoptic meteorology: pathway to seasonal rainfall prediction for sustainable agriculture and effective water resource management in West Africa but Nigeria in particular", *Journal of the Nigerian Meteorological Society* (NMS) 3(2), (2002) 81 - 86
- [14] - O. ZOLINA, C. SIMMER, K. BELYAEV, S. K. GULEV, P. KOLTERMANN, "Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years", *Journal of Climate* 26, (2013) 2022 - 2047
- [15] - S. SANOGO, A. H. FINK, J. A. OMOTOSHO, A. BA, R. REDL, V. ERMERT, "Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa", *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 35, (2015) 4589 - 4605
- [16] - S. FROIDUROT and A. DIEDHIOU, "Characteristics of wet and dry spells in the West African monsoon system", *Atmos. Sci. Let.* 18, (2017) 125 - 13, DOI: 10.1002/asl.73
- [17] - UNECA, "African Regional Climate Outlook Forums Best Practices", (2020), p. 3, <https://archive.uneca.org/publications/african-regional-climate-outlook-forums-best-practices>
- [18] - A. GIANNINI, A. ALI, C. P. KELLEY, B. L. LAMPTEY, B. MINOUNGOU, AND O. NDIAYE, "Advances in the prediction with the North American Multimodel Ensemble". *Geophysical Research Letters*, 47, (2020). [doi.org/10.1029/2020GL087341](https://doi.org/10.1029/2020GL087341)

- [19] - A. N. PETTITT, "A non-parametric approach to the change point problem", *Appl. Statist* 28(2), (1979) 126 - 135
- [20] - P. J. LAMB, "Persistence of Saharan drought", *Nature*, 299, (1982) 46 - 47
- [21] - T. B. MCKEE, "Drought monitoring with multiple timescales", In: Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology, Dallas, Texas, du 15 au 20 Janvier 1995, Boston American Meteorological Society, (1995) 233 - 236
- [22] - I. LONA, "Risques climatiques et pratiques culturelles du mil et du sorgho au Niger", Thèse de doctorat, Géographie, Université Abdou Moumouni (2014)
- [23] - T. LEBEL, G. PANTHOU ET T. VISCHEL, "Au Sahel, le climat durablement perturbé depuis la « grande sécheresse » ", *Le Monde Afrique* (2018), Publié le 12 novembre 2018 à 16h52 - Mis à jour le 12 novembre 2018 à 16h56 [https://www.lemonde.fr/afrique/article/2018/11/12/au-sahel-le-climat-durablement-perturbe-depuis-la-grande-secheresse\\_5382513\\_3212.html#](https://www.lemonde.fr/afrique/article/2018/11/12/au-sahel-le-climat-durablement-perturbe-depuis-la-grande-secheresse_5382513_3212.html#)
- [24] - J. B. OMOTOSHO, "spatial and seasonal variation of line squall over West Africa", *Arch. Met. Geophys. Bioll.* A33, (1984) 143
- [25] - L. DESCROIX, A. D. NIANG, G. PANTHOU, A. BODIAN, Y. SANE, H. DACOSTA, M. M. ABDOU, J-P. VANDERVAERE, G. QUANTIN, "Evolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions : la sénégalie et le bassin du Niger moyen", *Climatologie*, vol. 12 (2015) 25
- [26] - A. BODIAN, "Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest)", *Revue Physio-Géo*, 8, 1, (2014) 297 - 312. [Google Scholar]
- [27] - P. CAMBERLIN, R. OKOOLA, M. DIOP, P. VALIMBA, "Identification des dates de démarrage et de fin de saison des pluies : applications à l'Afrique de l'est et au Sénégal", *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, Vol. 15, (2003) 295
- [28] - J-P. LAFORE ET M.W. MONCRIEFF, "A numerical investigation of the organization and interaction of the convective and stratiform regions of tropical squall lines". *J. Atmos. Sci.* 46, (1989) 521 - 544
- [29] - C. M. DUNNING, E. BLACK1, and R. P. ALLAN, "Later Wet Seasons with More Intense Rainfall over Africa under Future Climate Change", *Journal of Climate* (2018). DOI:10.1175/JCLI-D-18-0102.1
- [30] - L. M. NASSOUROU, B. SARR, A. ALHASSANE, S. TRAORE et B. ABDOURAHAMANE, "Perception et observation : les principaux risques agro-climatique de l'agriculture pluviale dans l'ouest du Niger", *Vetigo*, Volume 18 numéro 1 (mai 2018), <https://doi.org/10.4000/vertigo.20003>
- [31] - G. PANTHOU, T. VISCHEL et T. LEBEL, "Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel", *International Journal of Climatology* (2014), doi:10.1002/joc.3984. [Google Scholar]
- [32] - M. LY, S. B. TRAORE, A. ALHASSANE et B. SARR, " Evolution of some observed climate extremes in the west African Sahel", *Weather and Climate Extremes*, 1, (2013)19 - 25
- [33] - P. N. KABORE, A. OUEDRAOGO, M. SANON, P. YAKA, L. SOME, "Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du centre-nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015", *Climatologie*, vol. 14 (2017)
- [34] - A. ALHASSANE, S. SALACK, M. LY, I. LONA, S. B. TRAORE, B. SARR, "Evolution des risques agroclimatiques associés aux tendances récentes du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne". *Secheresse* 24 (2013) 282 - 93. doi : 10.1684/sec.2013.0400
- [35] - P. B. I. AKPONIKÈ, J. PETER et K. A. EULOGE, "Farmers' perception of climate change and adaptation strategies in Sub-Saharan West-Africa", 2nd International Conference: Climate, Sustainability and Development in Semi-arid Regions, August 16 - 20, Fortaleza - Ceará, Brazil, (2010) 15 p.
- [36] - J. GORNALL, R. BETTS, E. BURKE, R. CLARK, J. CAMP, K. WILLET, A. WILTSHIRE, "Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century", *Phil. Trans. R. Soc. B* 365, (2010) 2973 - 2989. doi:10.1098/rstb.2010.0158