Afrique SCIENCE *13(3) (2017) 83 - 97*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.info

Variabilité de la pluviométrie durant les périodes 1970 - 2009 dans les zones sahélienne, soudanienne et soudano-guinéenne au Mali

Cheick DIARRA[1*], Lassina DEMBELE[2] et Mody SOW[1]

[1] Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako, Faculté des Sciences et Techniques, Département d'Etudes et de Recherche, Laboratoire d'Optique, de Spectroscopie et de Sciences Atmosphériques (LOSSA), BP E3206, Mali
[2] Ecole Normale Supérieure de Bamako, Département d'Enseignement et de Recherche de Physique et Chimie, BP E241, Mali

* Correspondance, courriel : *cdiarra@lossa-mali-edu.org*

Résumé

Cette étude porte sur la variabilité de la pluviométrie dans les zones sahélienne, soudanienne et soudano-guinéenne au Mali durant les quatre décennies de la période 1970 - 2009. Nous avons utilisé les données sur la pluviométrie de six stations météorologiques qui sont implantées dans ces zones climatiques. Les variations interannuelles de la pluviométrie présentent des variabilités considérables d'année en année et en différentes localités d'une même zone climatique (par exemple, d'environ 250 mm à 640 mm, et d'environ 50 mm à 400 mm dans la zone sahélienne). Les valeurs des moyennes mensuelles présentent aussi des variabilités importantes, avec des quantités de pluies abondantes partout en juillet, août, septembre et surtout les pics en août. Les résultats des variations interannuelles de la pluviométrie enregistrée dans les six stations météorologiques considérées montrent qu'elle est irrégulière dans ces zones climatiques. Les variations des moyennes mensuelles de la pluviométrie enregistrée dans les six stations météorologiques montrent des différentes quantités de pluies d'une zone climatique à une autre avec souvent de débuts précoces de saison pluvieuse. Les valeurs de l'indice standardisé des précipitations (SPI) indiquent que, durant les quatre décennies de la période d'étude 1970 - 2009, les trois zones climatiques ont connu à la fois des années humides et des années sèches, avec de degrés de sévérité différents. Les deux premières décennies 1970 - 1979 et 1980 - 1989 ont été des décennies particulièrement sèches dans les trois zones climatiques considérées. Tandis que les deux dernières décennies 1990 - 1999 et 2000 - 2009 ont été tantôt humides, tantôt sèches dans trois ces zones climatiques.

Mots-clés : *variabilité, pluviométrie, zones climatiques, indice SPI.*

Abstract

Variability of the rainfall during the four decades of the period 1970 - 2009 in sahehian, soudanian and soudano-guinean zones in Mali

This study is taken on rainfall variability in sahehian, soudanian and soudano-guinean zones in Mali during the four decades of the period 1970 - 2009. In this study we have used rainfall data from the six considered meteorological sites which are implanted in those climatic zones. The rainfall interannual variations present

considerable variabilities in year by year, and at different locations from the same climatic zone (for example, about 250 mm to 640 mm, and about 50 mm to 400 mm in the sahelian zone). The monthly average values present also important variabilities with heavy rain quantities everywhere in July, August and September, and particularly the peaks in August. Results of interannual variations of the registered rainfall in the six considered meteorological sites indicate that it is irregular in those climatic zones. The monthly variations of registered rainfall in the six meteorological sites show different rain quantities from a climatic zone to another with often early beginnings of rainy season. Values of the standardized of precipitation index (SPI) indicate that, during the four decades of the study period 1970 - 2009 the three climatic zones have known at the same time humid years and dry years with different severity levels. The both first decades 1970 - 1979 and 1980 - 1989 have been particularly dry decades in the three considered climatic zones. While the two last decades 1990 - 1999 and 2000 - 2009 have been sometimes humid sometimes dry in these three climatic zones.

Keywords : *variability, rainfall, climatic zones, index SPI.*

1. Introduction

Le Mali est un vaste pays continental, situé au centre de l'Afrique de l'Ouest [1]. Le Mali a de multiples vulnérabilités de changement et de variabilité du climat. C'est l'un des pays en voie de développement avec une économie qui est fortement liée à la production céréalière des saisons pluvieuses [2]. Le climat y est tropical sec et constitué de quatre types : un climat désertique de type saharien, un climat sahélien, un climat soudanien et un climat soudano-guinéen. Les conditions agro-climatiques varient considérablement au Mali [2] et dépendent beaucoup de la distribution spatiale et temporelle de la pluviométrie. Le Mali connaît l'alternance de deux saisons qui sont une saison sèche et une saison pluvieuse (saison hivernale). La durée de la saison sèche varie de neuf (09) mois, d'octobre à juin au Nord et de six (06) ou sept (07) mois, de novembre à avril, voire mai au Sud. Elle aussi, est constituée d'une alternance de froid (novembre-février) et de chaleur (mars-mai). La saison pluvieuse (saison hivernale), encore appelée hivernage, dure environ trois (03) mois, de juillet à septembre au Nord avec des intersaisons plus ou moins marquées correspondant à des mois «ni pluvieux, ni secs». Au Sud, elle dure cinq (05) ou (06) mois, de juin à octobre dans certaines localités et de mai à octobre dans d'autres. Depuis les années 1970, périodes de grandes sécheresses dans le Sahel, le Mali et les autres pays de la bande sahélienne, subissent une variabilité pluviométrique se traduisant par l'alternance de périodes sèches et humides. Ce sont des séries d'années consécutives sèches ou humides.

Au Mali, les périodes sèches se caractérisent par de faibles précipitations (pluies) par rapport à la normale (1961 - 1990). Le phénomène qui en résulte est la sécheresse dont les effets néfastes sont entre autres, l'insuffisance des ressources en eau, la baisse de niveau des cours d'eau, la destruction des ressources forestières, l'assèchement des mares et des lacs, la diminution des ressources halieutiques, la dégradation des écosystèmes. Les périodes humides correspondent à une abondance relative des pluies, pouvant provoquer des inondations qui affectent beaucoup les populations riveraines. D'autres conséquences néfastes liées aux périodes humides peuvent être les orages violents et dévastateurs, la destruction des champs de cultures, les risques d'endommagement des habitations et des infrastructures [1]. De plus au Mali, il y a peu d'études scientifiques sur la variabilité climatique et du changement climatique en général et sur la pluviométrie en particulier. Le Mali est un pays basé sur l'agriculture, l'élevage et la pèche, dont les dépendances des pluies ne sont plus à démontrer. Une étude sur la variabilité de la pluviométrie ne fera que renforcer davantage le peu de connaissances existantes et pourra constituer de référence au pays pour les futures recherches sur la pluviométrie, voire le climat. Compte tenu de tous ces enjeux, nous avons voulu mener cette étude sur la variabilité de la pluviométrie à l'échelle nationale durant les décennies récentes :

1970 - 1979 ; 1980 - 1989 ; 1990 - 1999 ; 2000 - 2009. Soit une période d'étude de quarante (40) ans. Cette période d'étude est en accord avec les recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), demandant au moins trente (30) ans des périodes d'étude [3]. L'étude nous permettra de connaître éventuellement les causes des périodes sèches et humides enregistrées durant ces quatre décennies. Elle pourra contribuer éventuellement aux sources d'information sur l'évolution de la pluviométrie à l'échelle nationale durant les décennies à venir.

2. Méthodologie

2-1. Situations géographiques

Le Mali, un pays continental de l'Afrique de l'Ouest, est situé entre les 10° et 25° de latitude Nord et entre les 4° de longitude Est et 12° de longitude Ouest. Il couvre une superficie de 1 241 238 Km^2, soit environ 1 / 24^{ième} de la superficie totale de l'Afrique. Il partage 7000 Km de frontières avec 7 pays, qui sont : le Sénégal, la Mauritanie, l'Algérie, le Niger, le Burkina Faso, la Côte-d'Ivoire et la Guinée Conakry [1]. Jusqu'en 2015, le Mali compte huit (08) régions administratives et le district de Bamako (capitale du pays). Ces régions administratives sont : la région de Kayes (1ère région) ; la région de Koulikoro (2ème région) ; la région de Sikasso (3ème région) ; la région de Ségou (4ème région) ; la région de Mopti (5ème région) ; la région de Tombouctou (6ème région) ; la région de Gao (7ème région) et la région de Kidal (8ème région).

Figure 1 : *Carte de localisation géographique du Mali (Source DNM du Mali, 2007)*

2-2. Différentes zones climatiques

Le climat en Afrique de l'Ouest est diversifié et se caractérise du Nord au Sud par de grandes zones climatiques qui sont : la zone saharienne (au Nord) ; la zone sahélienne (au centre) ; la zone soudanienne (au centre aussi) ; la zone pré-guinéenne (ou zone soudano-guinéenne vers le Sud) et la zone guinéenne (zone tropicale humide au Sud). L'Afrique de l'Ouest, région tropicale, est connue pour sa pluviométrique climatique variable. La région-ouest africaine dépend fortement de la pluviométrie. La variabilité de la pluviométrie de cette région est sous l'influence du régime de mousson [4]. Le régime de mousson ouest-africaine est la caractéristique dominante du climat de la région [5]. Plusieurs programmes de recherche ont été menés en Afrique de l'ouest ces dernières années dans l'ordre d'approfondir les connaissances sur la mousson ouest-africaine [6]. Parmi ces programmes nous pouvons en citer : le projet AMMA (Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine / African monsoon multidisciplanary analysis), le projet AMMA Catch, et plus récemment, le centre West African Science Service Center for Climate Change and Adapted Land Use (WASCAL) [6]. Dans la zone sahélienne, la variabilité pluviométrique décennale au 20ème siècle a souvent excédé les fluctuations de pluviométrie de plusieurs régions de la Terre [7]. Le Sahel ouest-africain est bien connu pour les sévères sécheresses qui ont ravagé la zone dans les années 1970 et les années 1980. La moyenne annuelle de la pluviométrie dans le Sahel est de l'ordre de 100 à 200 mm dans sa partie Nord liée au désert du Sahara, et de 500 à 600 mm dans sa partie limite au Sud [8]. Le climat ouest-africain est caractérisé par les annonces des contrastes saisonniers régulés par la zone de convergence intertropicale (ZCIT).

La zone de convergence intertropicale (ZCIT) se manifeste à la surface par la zone de transition entre l'air sec et l'air humide des régions équatoriales, appelé le front intertropical (FIT). La ZCIT est caractérisée par la convergence des vents Hamattan, vents de Nord-est et originaire du Sahara et la mousson, vent du Sud-ouest provenant de l'Atlantique [8]. Les vents Harmattan, vents d'Est ou du Nord-est, sont les principaux mécanismes de la circulation générale atmosphérique, qui soufflent durant toute la saison sèche dans la région Ouest africaine. La période hivernale est caractérisée par la mousson, qui est un système de vents périodiques des régions tropicales dans le monde. La mousson ouest-africaine est l'un des plus importants systèmes de circulation atmosphérique dans les tropiques. Elle contrôle les vents, la température, les nuages et plupart des précipitations au-dessus d'une région (d'environ 5-25° Nord, 15° Ouest à 15° Est) [9] pendant la saison hivernale. Au Mali, le climat est reparti par l'alternance de deux saisons : une saison sèche et une saison pluvieuse. Les pluies liées aux lignes de grains sont particulièrement importantes aux latitudes sahéliennes. Le régime de mousson est le facteur dominant de la saison des pluies [1]. La pluviométrie annuelle est décroissante du Sud au Nord. Elle est repartie entre les différentes zones climatiques : la zone désertique saharienne au Nord avec une pluviométrie annuelle inférieure à 200 mm, la zone sahélienne au centre avec une pluviométrie annuelle comprise entre 200 mm et 600 mm et au Sud la zone soudanienne avec une pluviométrie annuelle comprise entre 600 mm et 1000 mm et la zone soudano-guinéenne avec une pluviométrie annuelle supérieure à 1000 mm [1].

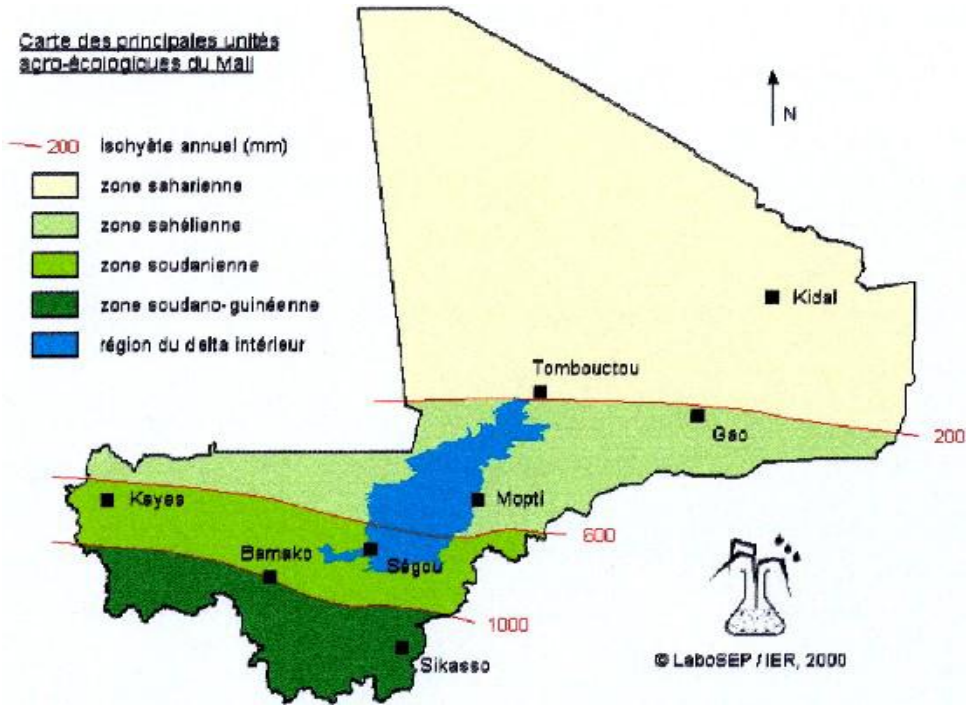


Figure 2 : *Carte de différentes zones climatiques au Mali (Source DNM du Mali, 2006 et 2007)*

2-3. Méthodologie des données

Les données utilisées dans cette étude sont les mesures des quantités de pluies cumulées (en mm) par mois, par an et par décennie durant la période d'étude considérée, 1970 - 2009. Soit une période d'étude de quarante (40) ans. Les stations météorologiques considérées sont la station Bamako-Sénou (Bamako), la station de Kayes, la station de Sikasso, la station de Ségou, la station de Mopti et la station de Gao. Ce sont des stations météorologiques principales du pays, implantées respectivement dans la capitale (Bamako) et les capitales régionales du pays. Ces stations météorologiques se trouvent respectivement dans les différentes zones climatiques ouest-africaines, qui sont reparties au Mali, du Nord au Sud comme suit : la zone saharienne, la zone sahélienne, la zone soudanienne et la zone pré-guinéenne (ou zone soudano-guinéenne). D'après la carte climatologique du Mali ***(Figure 2)***: la station de Bamako-Sénou se situe entre la zone soudanienne et la zone soudano-guinéenne ; les stations de Kayes et de Ségou sont situées dans la zone soudanienne ; la station de Sikasso se trouve dans la zone soudano-guinéenne ; la station de Mopti est située dans la zone sahélienne et la station de Gao se trouve au bord de la zone saharienne. Dans cette étude, la variabilité de la pluviométrie est analysée en considérant les variations interannuelles, les variations mensuelles et les variations / fréquences d'occurrence inter-saisonnières des moyennes mensuelles des pluies cumulées, et l'indice standardisé des précipitations (appelé en anglais, Standardized precipitation index SPI) des stations météorologiques citées ci-dessus, durant les périodes décennales entre 1970 et 2009.

3. Résultats et discussion

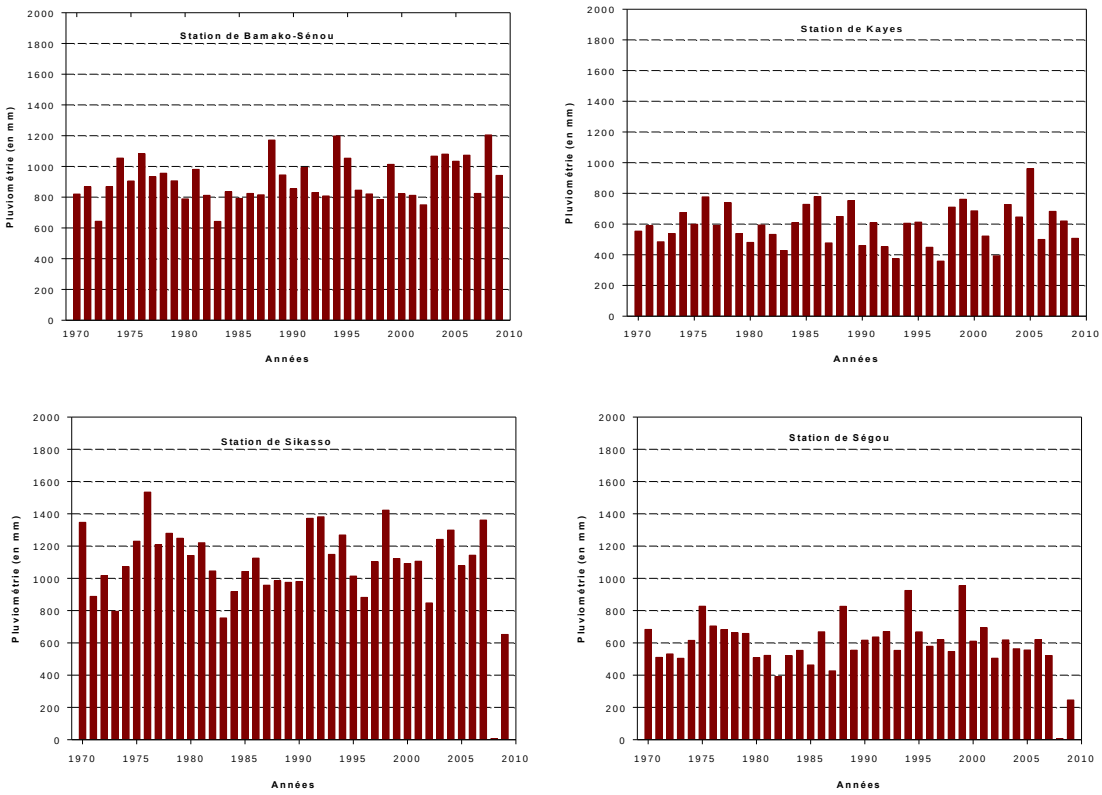
Cette partie, résultats et discussions, comporte les variations interannuelles et mensuelles de la pluviométrie, les variations interannuelles de l'indice standardisé des précipitations (SPI) et les fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse pour les six stations météorologiques considérées.

3-1. Variations de la pluviométrie enregistrée dans les stations météorologiques

Les variations de la pluviométrie enregistrée dans les six stations météorologiques est constituée des variations interannuelles et variations mensuelles durant la période de 1970 à 2009.

3-1-1. Variations interannuelles de la pluviométrie

Les variations interannuelles de la pluviométrie durant 1970 - 2009 sont représentées sur la ***Figure 3*** ci-dessous, et présentent des variabilités considérables d'année en année. Au niveau de la station de Bamako-Sénou, les moyennes annuelles des pluies sont considérables et varient de 600 mm à 1200 mm. Ceci s'explique de sa position géographique, à la limite entre la zone soudanienne et la zone soudano-guinéenne. Dans ces zones climatiques, les pluies sont abondantes. Pour la station de Kayes, les moyennes annuelles des pluies sont moins considérables que celles de Bamako-Sénou, avec des variabilités qui sont entre environ 360 mm et 1000 mm. Cette station se situe dans la zone soudanienne proche de la zone sahélienne du pays. Pour la station de Sikasso, dans la zone soudano-guinéenne, les moyennes annuelles des pluies enregistrées durant la période d'étude considérées, sont plus importantes et varient entre 600 mm et 1600 mm. Dans cette zone, les pluies sont beaucoup plus abondantes, à cause de sa proximité d'une partie de la région tropicale humide d'Afrique. Pour la station de Ségou, les moyennes annuelles des pluies enregistrées de 1970 à 2009, sont plus ou moins importantes, avec des variabilités entre 200 mm et 1000 mm. Cette station se trouve dans une partie de la zone soudanienne, partie sous l'influence des régimes pluviométriques du Sahel. Au niveau de la station de Mopti, station se trouvant dans la zone sahélienne du pays, les moyennes annuelles des pluies enregistrées sont plus ou moins importantes et présentent des variations entre 250 mm à 640 mm. Pour la station de Gao, située dans une partie de la zone sahélienne proche du Sahara, les moyennes annuelles des pluies enregistrées sont moins élevées et varient entre environ 50 mm et 400 mm. Ceci peut s'expliquer par la proximité de la partie à la zone saharienne où la pluviométrie ne dépasse guère. Nous notons des variabilités considérables de la pluviométrie dans les différentes stations météorologiques d'année en année. Ce qui signifie l'irrégularité de la pluviométrie dans les différentes zones climatiques considérées : zone sahélienne, zone soudanienne et zone soudano-guinéenne.



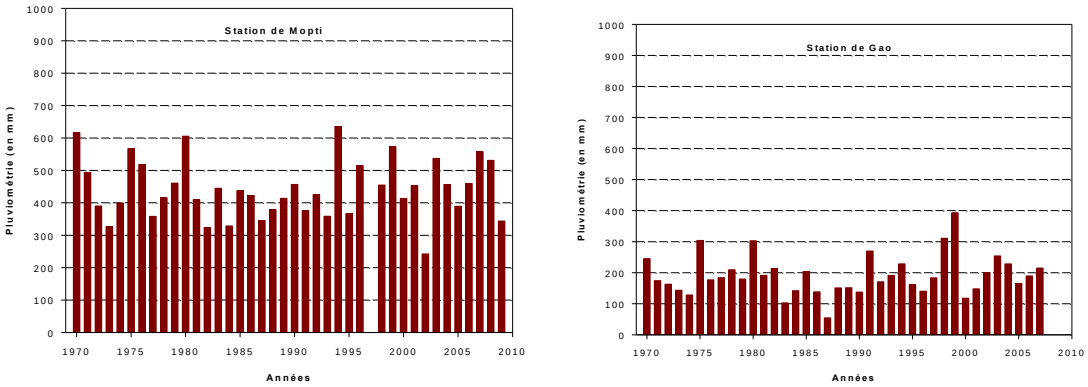


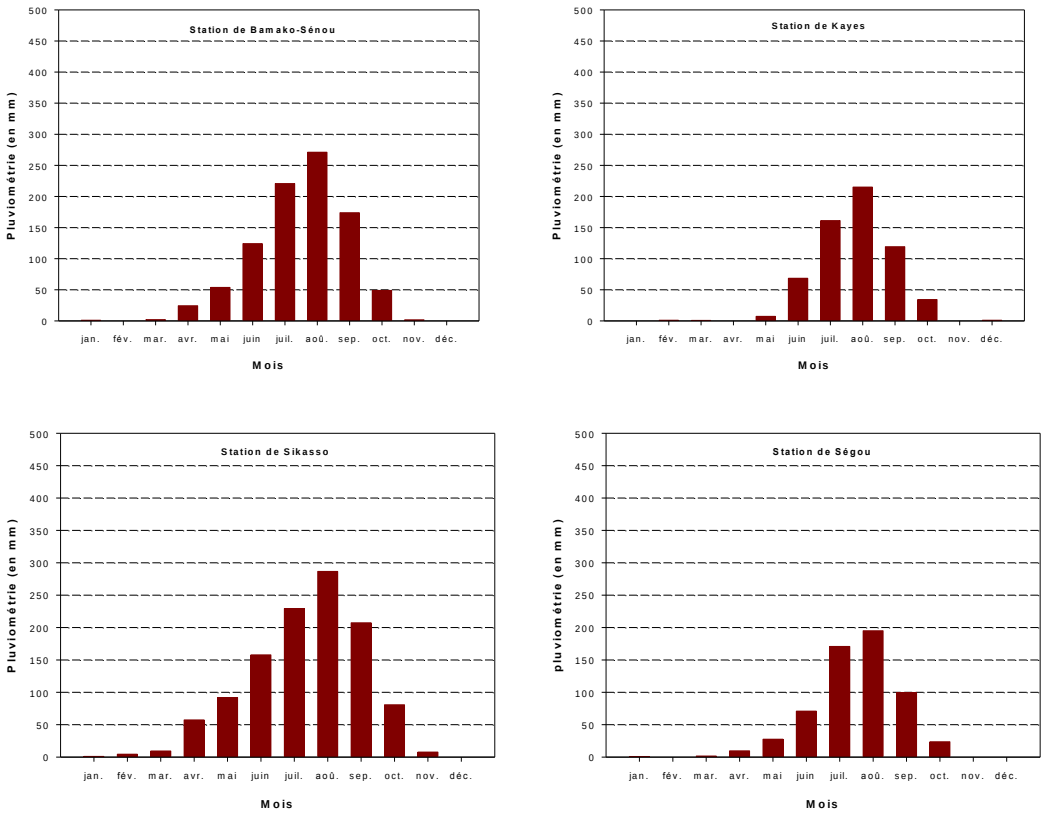
Figure 3 : *Variations interannuelles de la pluviométrie enregistrée dans les différentes stations météorologiques considérées durant les périodes 1970 - 2009*

3-1-2. Variations mensuelles de la pluviométrie

Les variations mensuelles de la pluviométrie durant la période 1970 - 2009 dans les différentes stations météorologiques considérées sont représentées sur la ***Figure 4*** ci-dessous. Pour la station de Bamako-Sénou, les moyennes mensuelles des pluies enregistrées de 1970 à 2009 présentent des variations considérables avec quatre pics. Les moyennes mensuelles des pluies enregistrées varient d'avril en octobre, d'environ 25 mm à 270 mm. Les quatre pics enregistrés correspondent à la période où l'hivernage s'est fortement installé dans la zone. La pluviométrie dans cette zone soudanienne, ainsi que celles des autres zones climatiques du pays sont régulées par le déplacement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), qui est caractérisé par l'arrivée et le retour de la mousson. Les mois sans pluies enregistrées, à savoir les mois de janvier, de février, de mars, de novembre et décembre, correspondent naturellement à la saison sèche dans la zone et qui concerne aussi en général les mois d'avril et de mai. Signalons que de très faibles quantités de pluies (pouvant être estimées à de traces de pluies) enregistrées en mars et en novembre ne peuvent indiquer en aucun cas le début et la fin d'hivernage. Notons que la saison sèche dans cette zone et dans les autres zones climatiques du pays est caractérisée par la présence du vent Harmattan, qui est un vent d'Est ou de Nord-est en provenance du Sahara. Nous avons noté, durant la période 1970 - 2009, des débuts d'hivernage avancés en avril et en mai.

Pour la station de Kayes, les moyennes mensuelles de la pluviométrie enregistrée durant la période 1970 - 2009 présentent des variations aussi considérables avec trois pics. Les mois des pluies, surtout les mois de juin, de juillet, d'août, et de septembre, correspondent à la période hivernale dans la zone avec au moins un début d'hivernage en avance au mois de mai. De très faibles quantités de pluies (estimées à de traces de pluies) enregistrées en février, en mars, en mai et en décembre n'influent rien sur le début et sur la fin d'hivernage dans la zone. Ce sont des pluies que nous pouvons appelé des "pluies non habituelles" ou "pluies précoces". Les mois sans pluies, à savoir les mois de janvier, de février, de mars, d'avril, de novembre et de décembre, correspondent à la saison sèche y compris le mois d'avril. Pour la station de Sikasso, les moyennes mensuelles de la pluviométrie enregistrée durant la période 1970 - 2009 présentent des variabilités importantes. Elles varient d'environ 5 mm à 280 mm, avec quatre pics. Les mois sans pluies indiquent la saison sèche dans la zone. Mais les variations des moyennes mensuelles de la pluviométrie indiquent des cas de pluies appelés cas des "pluies non habituelles" ou "pluies précoces" pendant la période de saison sèche en février, en mars et en novembre. De plus, nous pouvons noter la période hivernale longue avec comme début le mois d'avril. Pour la station de Ségou, les moyennes mensuelles de la pluviométrie enregistrée durant la période 1970 - 2009 présentent des variabilités considérables avec trois pics. Les moyennes

mensuelles des pluies enregistrées varient d'environ 10 mm à 200 mm. L'hivernage s'installe progressivement de mai en passant par le mois de juin et se termine en octobre avec au moins quelques quantités de pluies précoces en avril. Ce qui annonce souvent des débuts précoces d'hivernage dans la zone durant la période considérée. Les mois sans pluies, les mois de janvier, de février, de mars, correspondent à la période de la saison sèche y compris le mois de mai. Pour la station de Mopti, les moyennes mensuelles de la pluviométrie enregistrée durant la période 1970 - 2009 présentent des variabilités plus ou moins importantes avec trois pics proches l'un de l'autre. Les moyennes mensuelles des pluies enregistrées durant la période considérée varient d'environ 20 mm à 150 mm. La période hivernale est typiquement sahélienne, de juin à septembre, voire octobre, avec parfois des débuts d'hivernage précoces en mai. Les mois de janvier, de février, de mars, d'avril, de novembre et de décembre, y compris le mois de mai constituent véritablement la période de la saison sèche dans cette zone sahélienne. Pour la station de Gao, les moyennes mensuelles des pluies enregistrées durant la période 1970 - 2009, indiquent aussi des variabilités avec aussi trois pics. Les moyennes mensuelles de la pluviométrie varient d'environ 3-4 mm à 70 mm. Durant la période d'étude, 1970 - 2009, nous pouvons noter l'irrégularité des débuts d'hivernage dans toutes les trois zones climatiques considérées, à cause de cas de pluies précoces enregistrées dans les six stations météorologiques. De plus, les quantités des pluies enregistrées durant la période au niveau des six stations sont très différentes les unes des autres. Ce qui signifie que la pluviométrie est très variable dans une même zone climatique considérée. Notons aussi que les pluies sont essentiellement abondantes dans toutes les zones climatiques en juillet, surtout en août et en septembre, et de plus au mois de juin dans la zone soudano-guinéenne.



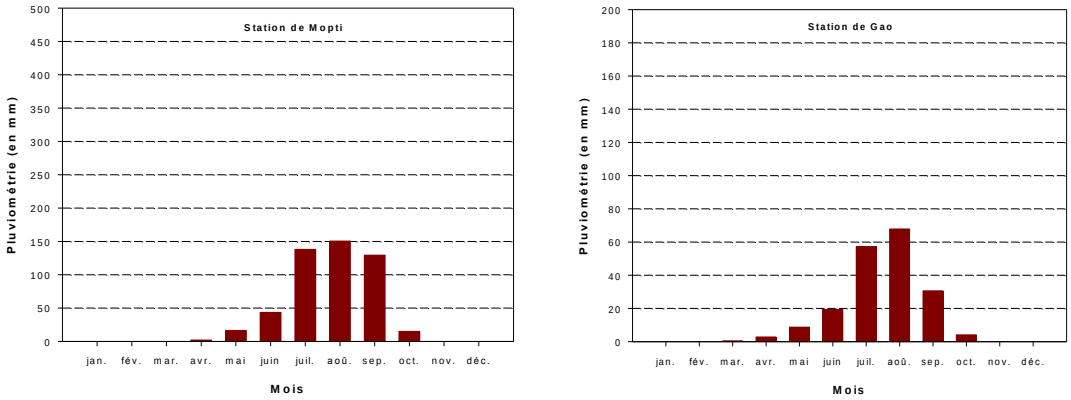


Figure 4 : *Variations des moyennes mensuelles de la pluviométrie enregistrée dans les six stations météorologiques considérées durant les périodes 1970 - 2009*

3-2. Indice standardisé des précipitations enregistrées dans les stations météorologiques

L'indice standardisé des précipitations ou encore indice normalisé des précipitations, en anglais standardized precipitation index (SPI) permet de déterminer la sévérité ou définir l'intensité des épisodes de sécheresse. L'indice standardisé de précipitations (Mckee et al., 1993, 1995), noté SPI dans la suite, est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs [10]. L'indice standardisé de précipitations *SPI* est défini par la ***Formule*** suivante [11] :

$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}}{\bar{\sigma}} \quad (1)$$

où, X_i est le cumul des pluies pour une année donnée sur une période considérée ; $\bar{X}$ est la moyenne des cumuls des pluies annuelles sur la même période considérée ; $\bar{\sigma}$ est la moyenne des écarts-types des cumuls des pluies sur la même période considérée.

Pour calculer l'indice SPI, il faut disposer idéalement de relevés mensuels s'étalant sur au moins 20 à 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans, voire plus, ce qui constitue la période optimale [10]. Les critères d'un épisode de sécheresse en rapport avec la valeur de l'indice SPI ont été défini par Mckee et al., (1993). Une sécheresse sévit quand l'indice SPI ***(Tableau 1)*** présente de façon continue une valeur négative (de -1,0 ou moins) et se termine lorsque l'indice SPI devient positif. Par conséquent, on distingue pour chaque épisode de sécheresse une durée, avec un début et une fin et une intensité pour chaque mois durant lequel l'épisode se poursuit [10].

3-2-1. Critères d'humidité et de sécheresse selon l'indice SPI

Les critères des épisodes d'humidité et de sécheresse avec les valeurs correspondantes de l'indice SPI sont mentionnés dans le ***Tableau 1*** ci-dessous.

Tableau 1 : *Critères des épisodes d'humidité et de sécheresse aves les valeurs les valeurs correspondantes de l'indice SPI*

Valeurs de l'indice SPI	Critères d'humidité et de sécheresse
de 2,0 et plus	Extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
de 1,0 à 1,49	Modérément humide
de - 0,99 à 0,99	Proche de la normale
de - 1,0 à - 1,49	Modérément sec
de - 1,5 à - 1,99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

(Source : Guide d'utilisation de l'indice de précipitation normalisé, OMM-N° 1090, 2012)

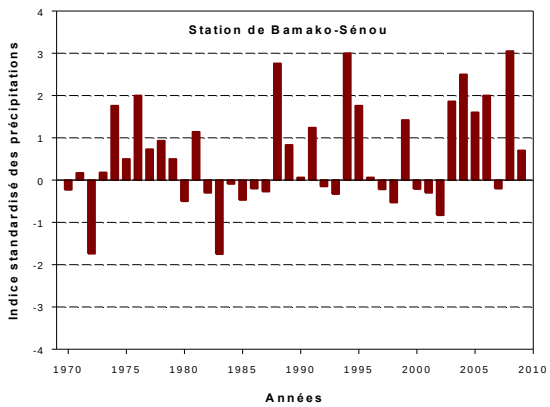
3-2-2. Variations interannuelles de l'indice SPI

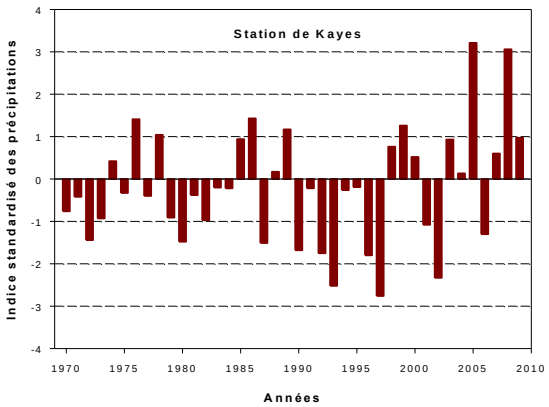
Les variations interannuelles de l'indice SPI de 1970 à 2009 des six stations météorologiques sont représentées sur la ***Figure 5*** ci-dessous. Les variations de l'indice SPI présentent les deux types de valeurs : les valeurs négatives et les valeurs positives. Pour une région considérée, les valeurs positives indiquent les épisodes d'humidité et les valeurs négatives correspondent aux épisodes de sécheresse. Dans cette partie, les épisodes d'humidité et de sécheresse ont été qualifiés selon leur degré de sévérité. Pour la station de Bamako-Sénou, les variations interannuelles de l'indice SPI présentent des variabilités considérables avec les deux valeurs positives et négatives durant la période 1970 - 2009 d'année en année. Les valeurs positives de l'indice SPI sont beaucoup plus nombreuses que les valeurs négatives. Il y a cinq valeurs positives plus élevées ($2,0 \leq SPI \leq 3,0$) qui correspondent aux épisodes d'humidité extrêmement sévère. Il y a six cas d'humidité très sévères ($1,5 \leq SPI < 2,0$). Les autres valeurs positives de l'indice ($0,0 < SPI < 1,5$) correspondent aux années modérément humides et les cas humides proches de la normale. Il y a deux cas de sécheresse très sévère ($-2 < SPI < -1,5$) et qui correspondent respectivement aux années 1972 et 1983. Les autres valeurs négatives de l'indice SPI sont proches de zéro et correspondent à des situations de sécheresse proches à la normale. Pour la station de Kayes, les variations interannuelles de l'indice SPI indiquent des variabilités beaucoup plus importantes avec des valeurs positives et négatives d'année en année.

Les cas de valeurs négatives de l'indice SPI sont plus élevés que ceux des valeurs positives. Il y a deux cas de valeurs positives plus élevées ($SPI > 3,0$) indiquant deux années d'humidité extrêmement sévère. Les autres valeurs positives de l'indice SPI ($0,1 < SPI < 0,5$) correspondant aux cas humides proches à la normale et quelques cas d'humidité modérément sévère. Il y a trois cas de sécheresse extrêmement sévère ($-3,0 < SPI < -2,0$). Il existe environ quatre cas de sécheresse très sévère ($-2,0 < SPI \leq -1,5$). Les autres valeurs négatives de l'indice SPI ($-1,3 \leq SPI < -0,1$) correspondent aux cas de sécheresse modérément sévère et aux situations de sécheresse proches de la normale. Pour la station de Sikasso, les variations interannuelles de l'indice SPI présentent des variabilités plus importantes avec des valeurs positives et négatives d'année en année. Il y a autant de valeurs positives que de valeurs négatives de l'indice SPI. Les variations interannuelles indiquent six cas d'humidité extrêmement sévère ($2,0 \leq SPI < 4,0$). Il y a deux cas d'humidité très sévère ($1,5 \leq SPI < 2$). Les autres valeurs positives de l'indice SPI ($0 < SPI \leq 1,40$) correspondant aux cas d'humidité modérément sévère et aux situations humides proches de la normale. Il existe trois cas de sécheresse extrêmement sévère ($-3,0 < SPI < -2$). Il y a deux cas de sécheresse très sévère ($-2 < SPI \leq 1,5$). Les autres valeurs négatives de l'indice SPI ($-1,4 < SPI < 0,0$) correspondent aux cas de sécheresse modérément sévère et des tendances proches à la normale. Pour la station de Ségou, les variations interannuelles de l'indice SPI

indiquent des variabilités considérables avec des valeurs positives et négatives d'année en année. Il existe plus de valeurs négatives que de valeurs positives de l'indice SPI. Les variations interannuelles indiquent trois cas d'humidité extrêmement sévère ($3,0 \leq SPI < 5,0$). Elles indiquent un seul cas d'humidité très sévère ($1,5 \leq SPI < 2,0$) et un cas d'humidité modérément sévère ($1 < SPI \leq 1,2$). Les autres valeurs positives de l'indice SPI ($0,0 < SPI < 1,0$) correspondent aux cas humides proches de la normale. Il y a six cas de sécheresse extrêmement sévère ($-4,0 \leq SPI \leq -2,0$) et six cas de sécheresse très sévère ($-2,0 < SPI < -1,5$). Il y a cinq cas de sécheresse modérément sévère ($-1,5 \leq SPI \leq -1,0$). Les autres valeurs négatives de l'indice SPI ($-0,4 \leq SPI < -0,1$) qui correspondent aux cas secs proches de la normale. Pour la station de Mopti, les variations interannuelles de l'indice SPI présentent aussi des variabilités plus importantes avec des valeurs positives et négatives d'année en année. Les valeurs négatives de l'indice SPI sont beaucoup plus nombreuses que ses valeurs positives. Il existe quatre épisodes d'humidité extrêmement sévère ($2,0 \leq SPI \leq 3,0$) et trois cas d'humidité très sévère ($1,5 \leq SPI < 2,0$) et quatre épisodes d'humidité modérément sévère ($0,2 \leq SPI \leq 1,5$). Les variations interannuelles de l'indice SPI durant la période 1970 - 2009 indiquent plusieurs épisodes de sécheresse extrêmement sévère, au total 13 épisodes, ($-5,5 \leq SPI \leq -2$). Il y a six épisodes de sécheresse très sévère ($-2,8 \leq SPI \leq -1,5$).

Les autres valeurs négatives de l'indice SPI ($-1,2 \leq SPI < 0,0$) correspondent aux épisodes de sécheresse modérément sévère et quelques tendances à la normale. Pour la station de Gao, les variations interannuelles de l'indice SPI indiquent des variabilités importantes avec des valeurs positives et négatives d'année en année de 1970 à 2009. Les valeurs négatives de l'indice SPI sont beaucoup plus nombreuses que ses valeurs positives. Il y a cinq cas d'humidité extrêmement sévère ($2,0 < SPI \leq 6,2$). Il existe deux cas d'humidité très sévère ($1,5 < SPI < 2,0$) et les années correspondantes sont 1970 et 2003. Il y a un seul cas d'humidité modérément sévère ($1 \leq SPI \leq 1,4$) qui correspond à l'année 2009. Les autres valeurs positives de l'indice SPI ($0,0 < SPI \leq 0,5$) correspondent aux cas humides proches de la normale. Il y a quatre épisodes de sécheresse extrêmement sévères ($-5,0 < SPI \leq -2,0$). Il existe environ sept épisodes de sécheresse très sévère ($-2 < SPI \leq -1,5$). Les autres valeurs négatives de l'indice SPI ($-1,5 < SPI < 0,0$) correspondent aux épisodes de sécheresse modérément sévère et aux cas secs proches de la normale. Durant la période 1970 - 2009 les six stations météorologiques considérées indiquent des années humides et des années sèches de différents degrés de sévérité. Ceci signifie que durant les quatre décennies considérées (1970 - 2009) les trois zones climatiques ont enregistré à la fois des années humides et des années sèches dont certaines étant très sévères, voire extrêmement sévères.





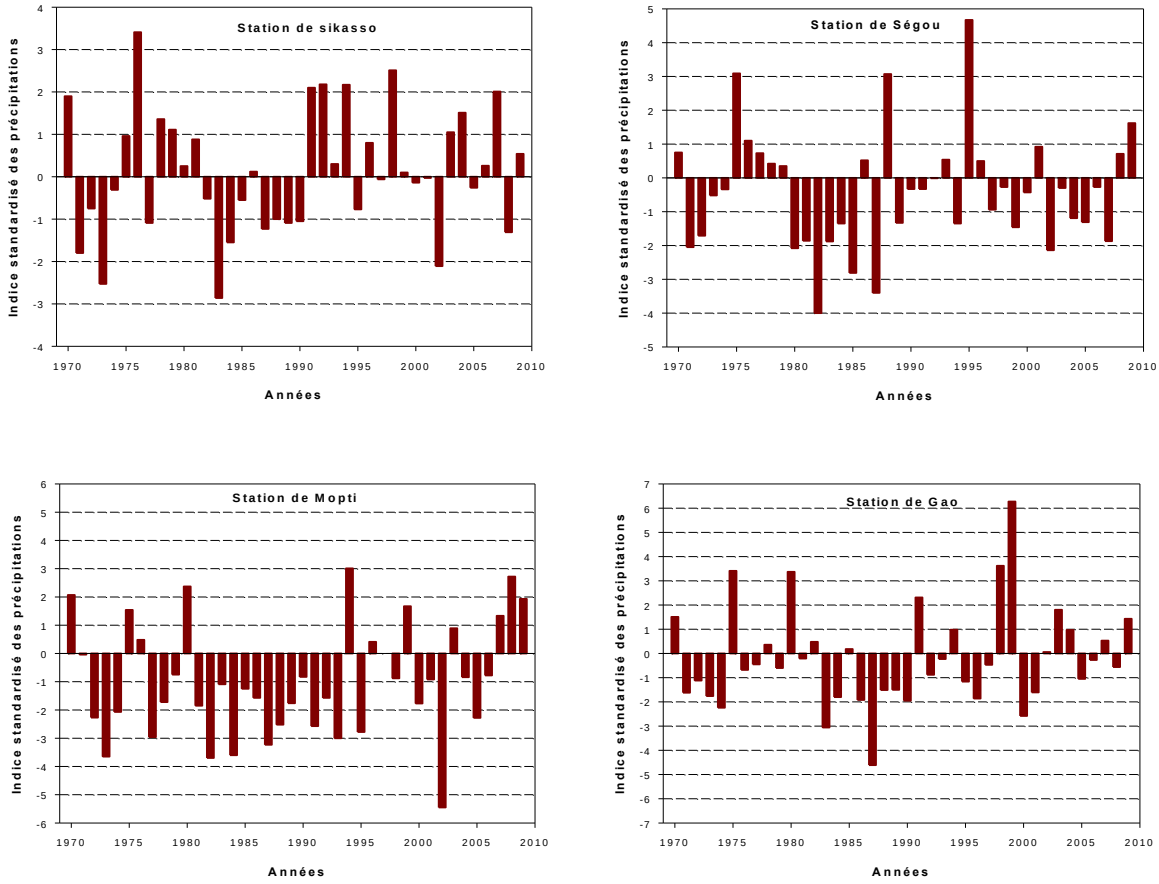


Figure 5 : *Variations interannuelles de l'indice standardisé des précipitations enregistrées dans les six stations météorologiques considérées durant les périodes 1970 - 2009*

3-3. Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse, et caractérisation des périodes décennales

Les ***Tableaux*** ci-dessous portent les fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse selon les valeurs de l'indice SPI avec indication des années de record durant la période d'étude(1970 - 2009) de différentes météorologiques considérées. Les fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse sont classées par degrés de sévérité qui sont ainsi donnés : EH est extrêmement humide ; TH désigne très humide ; MH est modérément humide ; HPN désigne les épisodes humides proches de la normale ; SPN désigne les épisodes secs proches de la normale ; MS est modérément sec ; TS est très sec ; ES désigne extrêmement sec. Les quatre décennies de la période d'étude (1970 - 2009) sont caractérisées selon le nombre des années humides et des années sèches, qui correspondent aux fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse dans les ***Tableaux*** ci-après. Ainsi, pour la station de Bamako-Sénou, la décennie 1970 - 1979 a connu plus d'années humides et que d'années sèches. La décennie 1980 - 1989 a été marquée par plus d'années de sécheresse que d'années humides. La décennie 1990 - 1999 a connu plus d'années humides que d'années sèches. Enfin, la décennie 200 - 2009 a été marquée par plus d'années humides et que d'années sèches. Pour la station de Kayes, les premières décennies 1970 - 1979 ; 1980 - 1989 ; 1990 - 1999 ont connu beaucoup plus d'années de sécheresse que d'années humides. La dernière décennie a été une décennie plus humide que sèche, avec sept (07) cas d'humidité contre seulement trois (03) cas de sécheresse. Pour la station de Sikasso, la décennie 1970 - 2009 a connu légèrement de sécheresse qu'humidité. La décennie 1980 - 1989 a été une décennie particulièrement plus sèche, tandis que la décennie 1990 - 1999 a été une décennie beaucoup plus humide.

Enfin, la décennie 2000 - 2009 a été une décennie équilibrée avec autant d'humidité que de sécheresse. Pour la station de Ségou, la décennie 1970 - 1979 a été une décennie à la fois humide et sèche. La décennie 1980 - 1989 a été une décennie particulièrement plus sèche avec seulement deux années d'humidité dont l'une extrêmement humide et l'autre tendant vers la normale. Les deux dernières décennies 1990 - 1999 et 2000 - 2009 ont été des décennies à la fois humide et sèche. Pour la station de Mopti, les quatre décennies considérées 1970 - 1979 ; 1980 - 1989 ; 1990 - 1999 ; 2000 - 2009 ont connu beaucoup plus de sécheresse que d'humidité. Pour la station de Gao, la décennie 1970 - 1979 a été autant humide, autant sèche. La décennie 1980 - 1989 a été une décennie plus sèche. Les deux dernières décennies ont été à la fois des décennies humides et sèches. Durant les quatre décennies correspondantes de la période d'étude (1970 - 2009), les ***Tableaux*** des valeurs annuelles et décennales ci-dessous ont indiqué des décennies plus humides, moins sèches ou des décennies plus sèches, moins humides. Ainsi, il ressort que les deux premières décennies 1970 - 1979 et 1980 - 1989 ont été des décennies particulièrement sèches dans les trois zones climatiques considérées, à savoir, la zone sahélienne ; la zone soudanienne et la zone soudano-guinéenne. Les deux dernières décennies 1990 - 1999 et 2000 - 2009 ont été des décennies tantôt humides, tantôt sèches dans ces trois zones climatiques.

Tableau 2 : *Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse par décennie selon les valeurs de l'indice SPI avec indication des années de record durant la période 1970 - 2009 de la station de Bamako-Sénou*

Station de Bamako-Sénou										
Périodes décennales	Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse								Année EH ou TH	Année ES ou TS
	EH	TH	MH	HPN	SPN	MS	TS	ES		
1970 - 1979	01	01	....	06	01	....	01	....	1976	1972
1980 - 1989	01	....	01	01	06	....	01	....	1988	1983
1990 - 1999	01	03	....	02	04	....	....	....	1994	....
2000 - 2009	02	03	....	01	04	....	....	....	2008	....

Tableau 3 : *Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse par décennie selon les valeurs de l'indice SPI avec indication des années de record durant la période 1970 - 2009 de la station de Kayes*

Station de Kayes										
Périodes décennales	Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse								Année EH ou TH	Année ES ou TS
	EH	TH	MH	HPN	SPN	MS	TS	ES		
1970 - 1979	....	....	02	01	06	01	....	....	....	....
1980 - 1989	....	....	02	02	02	02	01	01	....	1983
1990 - 1999	....	....	01	01	03	....	03	02	....	1997
2000 - 2009	02	....	....	05	....	02	....	01	2005	2002

Tableau 4 : *Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse par décennie selon les valeurs de l'indice SPI avec indication des années de record durant la période 1970 - 2009 de la station de Sikasso*

Station de Sikasso										
Périodes décennales	Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse								Année EH ou TH	Année ES ou TS
	EH	TH	MH	HPN	SPN	MS	TS	ES		
1970 - 1979	01	01	01	01	02	02	01	01	1976	1973
1980 - 1989	....	....	....	03	02	03	01	01	....	1983
1990 - 1999	04	....	....	02	03	01	....	....	1998	....
2000 - 2009	01	01	....	02	03	02	....	01	2007	2002

Tableau 5 : *Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse par décennie selon les valeurs de l'indice SPI avec indication des années de record durant la période 1970-2009 de la station de Ségou*

Station de Ségou										
Périodes décennales	Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse								Année EH ou TH	Année ES ou TS
	EH	TH	MH	HPN	SPN	MS	TS	ES		
1970 - 1979	01	….	01	04	02	….	01	01	1975	1971
1980 - 1989	01	….	….	01	….	02	02	04	1988	1982
1990 - 1999	01	….	….	02	05	02	….	….	1995	….
2000 - 2009	….	01	….	02	03	02	01	01	2009	2002

Tableau 6 : *Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse par décennie selon les valeurs de l'indice SPI avec indication des années de record durant la période 1970-2009 de la station de Mopti*

Station de Mopti										
Périodes décennales	Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse								Année EH ou TH	Année ES ou TS
	EH	TH	MH	HPN	SPN	MS	TS	ES		
1970 - 1979	01	01	….	01	02	….	01	04	1970	1973
1980 - 1989	01	….	….	….	….	02	03	04	1980	1982
1990 - 1999	01	01	….	01	02	….	01	03	1994	1983
2000 - 2009	01	01	01	01	03	….	01	02	2008	2002

Tableau 7 : *Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse par décennie selon les valeurs de l'indice SPI avec indication des années de record durant la période 1970 - 2009 de la station de Gao*

Station de Gao										
Périodes décennales	Fréquences des épisodes d'humidité et de sécheresse								Année EH ou TH	Année ES ou TS
	EH	TH	MH	HPN	SPN	MS	TS	ES		
1970 - 1979	01	01	….	02	02	01	02	01	1975	1974
1980 - 1989	01	….	….	02	01	….	04	02	1980	1987
1990 - 1999	03	….	….	01	03	02	01	….	1999	1990
2000 - 2009	….	01	01	03	02	….	02	01	2003	2000

5. Conclusion

Durant les quatre décennies de la période d'étude considérée (1970 - 2009), nous pouvons noter de variabilités considérables d'année en année de la pluviométrie enregistrée dans les six stations météorologiques reparties entre les trois zones climatiques considérées, à savoir la zone sahélienne ; la zone soudanienne et la zone soudano-guinéenne. Les variations interannuelles de la pluviométrie présentent des variabilités considérables d'année en année et en différentes localités d'une même zone climatique. Les valeurs des moyennes mensuelles présentent aussi des variabilités importantes, avec des quantités de pluies abondantes partout en juillet, août, septembre et surtout les pics en août. Les résultats des variations interannuelles de la pluviométrie enregistrée dans les six stations météorologiques considérées montrent qu'elle est irrégulière dans ces zones climatiques. Les variations des moyennes mensuelles de la pluviométrie enregistrée dans les six stations météorologiques montrent des différentes quantités de pluies d'une zone climatique à une autre avec souvent de débuts précoces de saison pluvieuse. Les valeurs de l'indice

standardisé des précipitations (SPI) indiquent que, durant les quatre décennies de la période d'étude 1970 - 2009, les trois zones climatiques ont connu à la fois des années humides et des années sèches, avec de degrés de sévérité différents. Concernant les quatre décennies de la période d'étude (1970 - 2009), il ressort que les deux premières décennies 1970 - 1979 et 1980 - 1989 ont été des décennies particulièrement sèches dans les trois zones climatiques. Les deux dernières décennies 1990 - 1999 et 2000 - 9009 ont été des décennies très variables dans ces trois zones climatiques. Elles ont connu tantôt plus d'années humides dans une zone, tantôt plus d'années sèches dans une autre zone.

Remerciements

Nos remerciements sont adressés à la Direction Nationale de la Météorologie du Mali (DNM), aujourd'hui devenue Agence Mali Météo, pour l'acquisition des données sur la pluviométrie de 1970 à 2009 des stations de Bamako, de Kayes, de Sikasso, de Ségou, de Mopti et de Gao.

Références

[1] - Programme d'action national d'adaptation aux changements climatiques (PANA), (document de service), Direction Nationale de la Météorologie du Mali (DNM), (juillet 2007).

[2] - KRISTIS L. EBI, JONATHAN PADGHAM, MAMADOU DOUMBIA, ALPHA KERGNA, JOEL SMITH, TANVEER BUTT, BRUCE MCCARL, Smallholders adaptation to climate change in Mali, Climatic Change, DOI 10.1007/s10584-011-0160-3, 108 (2011) 423 - 236

[3] - ANDRE HUFTY (ouvrage), Introduction à la Climatologie, de boeck, (2001) 542 p.

[4] - F. YOROBA, A. DIAWARA, K. Y. KOUADIO, G. SCHAYES, A. P. ASSAMOI, K. B. KOUASSI, A. A. KOUASSI, E. TOUALY, Analysis of West African rainfall using a Regonal Climate Model, International Journal of Environmental Sciences, Vol. 1, N° 6 (2011)

[5] - I. KOUMARE, Temporal / Spatial Distribution of Rainfall and the Associated Circulation Anomalies over West Africa, Pakistan Journal of Meteorology, Vol. 10, Issue 20 (Jan. 2014)

[6] - ADAMA BAMBA, BASTIEN DIEPPOIS, ABDOURAHAMANE KONARÉ, THIERRY PELLARIN, AHMED BALOGUN, NADINE DESSAY, BAMORY KAMAGATÉ, ISSIAKA SAVANÉ, ARONA DIÉDHIOU, Changes in Vegetation and Rainfall over West Africa during the Last Three Decades (1981 - 2010), Atmospheric and Climate Sciences, 5 (2015) 367 - 379.

[7] - SOULEYMANE SANOGO, ANDREAS H. FINK, JEROME A. OMOTOSHO, ABDRAMANE BA, ROBERT REDL, Spatio-temporal characteristics of the recent rainfall recovery in West Africa, International Journal of Climatology, Doi: 10.1002/joc.4309, (2015)

[8] - SHAORON E. NICHOLSON, The West African Sahel : A review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability, Hindawi Publishing Corporation - ISRN Meteorology, Vol. 2013, Article ID 453521, (2013) 32 p.

[9] - PETER KNIPPERTZ, MAT J. EVANS, PAUL R. FIELD, ANDREAS H. FINK, CATHERINE LIOUSSE, The possible role of local air pollution in climate change in West Africa, Nature Climate Change, Vol. 5 (2015)

[10] - Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé (document de référence), Organisation météorologique mondiale, OMM, N°1090 (2012)

[11] - D. S. WILKS (ouvrage), Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Second Edition, Academic Press, (2006) 627 p.