

UNE EVALUATION COMPARATIVE DES SEQUENCES DE SECHERESSE METEOROLOGIQUE PAR INDICES, PAR ECHELLES DE TEMPS ET PAR DOMAINES CLIMATIQUES AU SENEGAL

A COMPARATIVE ASSESSMENT OF SEQUENCES OF DROUGHT WEATHER INDICES, BY TIME SCALES AND CLIMATE IN SENEGAL AREAS

C. FAYE^(*1), A. NDIAYE⁽²⁾, I. MBAYE⁽³⁾

¹Département de Géographie / U.F.R. Sciences et Technologies / Université Assane Seck de Ziguinchor / Laboratoire de Géomatique et d'Environnement, BP 523 Ziguinchor. Sénégal.

²Département de Géographie / Faculté des Lettres et Sciences Humaines / Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP 5005 Dakar. Sénégal.

³Laboratoire de Géomatique et d'Environnement / U.F.R. Sciences et Technologies / Université Assane Seck de Ziguinchor, BP 523 Ziguinchor. Sénégal.

*Corresponding Author Email: cheikh.faye@univ-zig.sn

Reçu: 9 Novembre 2016, Accepté : 15 Février 2017, En ligne : 5 April 2017

RESUME:

La gestion des ressources en eau dans nos Etats est de plus en plus difficile ces derniers temps en raison de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. Le Sénégal, comme la plupart Etats tropicaux, a connu une alternance de périodes humide et sèche. Dans ce contexte climatique de plus en plus perturbé par les activités anthropiques, il est indispensable d'analyser les épisodes secs sur différents domaines climatiques, à diverses échelles temporelles et par divers indices en vue de proposer aux populations des mesures d'atténuation ou d'adaptation en matière de gestion de l'eau. Dans cet article, les données pluviométriques de six stations localisées dans les trois domaines climatiques ont été analysées.

L'analyse a utilisé et comparé les valeurs de l'indice logarithme décimal des déviations pluviométrique (IDP), l'indice des anomalies pluviométriques (IAP) et l'indice standardisé de précipitations (ISP) calculés pour des échelles de temps de 5 ans, de 25 ans et de 50 ans. Les résultats indiquent que les sécheresses les plus remarquables de par leur

intensité, leur durée et leur fréquence se sont produites durant les décennies 1970 et 1980 quel que soit l'indice, l'échelle de temps et le domaine climatique considéré. Ces épisodes secs ont atteint leur paroxysme en 1972 et 1983 avec des sécheresses d'une sévérité extrême. Les domaines climatiques sont bien affectés par la sécheresse, mais à des degrés divers. En outre, il ressort que l'indice ISP et l'échelle de temps à long terme semble les mieux appropriés pour décrire avec plus de précisions les épisodes secs au Sénégal, et le domaine sahélien continental le plus touché.

Mots-clés : changement climatique, sécheresse, indice logarithme décimal des déviations pluviométrique, indice des anomalies pluviométriques, indice standardisé de précipitations.

SUMMARY:

The management water resource in our States is harder and harder lately because of the frequency and of the intensity of droughts. Senegal, as most tropical States, knew an alternation of wet and dry periods. In this climatic context more and more

disrupted by the anthropological activities, it is essential to analyze the dry episodes on various climatic domains, in diverse temporal scales and by diverse indications to propose to the populations of the measures of mitigation or adaptation regarding management of water. In this article, pluviometric data of six stations located in three climatic domains were analyzed. The analysis used and compared the values of the rainfall deviations decimal logarithm index (RDI), the rainfall anomalies index (RAI) and the standardized precipitation index (SPI) calculated for timescales of 5 years, of 25 years and of 50 years. The results indicate that the most remarkable droughts due to their intensity, their duration and their frequency occurred during decades 1970 and 1980 whatever the index, the timescale and the used climatic domain. These dry episodes reached their paroxysm in 1972 and 1983 with droughts of an extreme severity. The climatic domains are affected well by drought, but to varying degrees. Besides, it appears that the ISP index and the long-term timescale seems the best suited to describe with more precision the dry episodes in Senegal, and most affected continental Sahelian domain.

Keywords: climate change, drought, rainfall deviations decimal logarithm index, rainfall anomalies index, standardized precipitation index.

1. INTRODUCTION

La sécheresse est un phénomène naturel qui pose de nombreux problèmes à travers le monde dans la mesure où elle provoque des ponctions énormes sur les ressources naturelles et particulièrement sur les ressources en eau, cela aussi bien en zone rurale qu'en milieu urbain, ce qui constitue d'énormes déperditions pour la production agricole et énergétique (Barua et al., 2009). Génétiquement, les sécheresses sont associées aux intervalles sans précipitations et suffisamment longues pour que le déficit hydrique soit ressenti par les systèmes naturels ou humains (Stângă, 2009). De même, elles peuvent être liées à l'insuffisance des précipitations, à la forte évapotranspiration et la surexploitation de ressources en eau ou même à la combinaison de tous ces facteurs (Bhuiyan, 2004). De façon générale, la sécheresse représente la période et l'état de déficit hydrique causés par la différence négative entre les entrées et les sorties d'eau dans

le système, provoquant ainsi des déséquilibres et des disfonctionnements de caractère réversible ou irréversible (Stângă, 2009). Dans un autre cadre, la sécheresse est l'une des conditions climatiques extrêmes qui affecte plus de personnes que toute autre forme de catastrophe naturelle (Wilhite, 2000). En effet, depuis ces dernières décennies, l'occurrence d'importantes sécheresses affectant de grands territoires sur tous les continents, souligne l'importance du phénomène (Beaudin, 2007). Les pays en développement tout comme les pays industrialisés en sont touchés. Dans les pays en développement, les effets peuvent être très désastreux (Soro et al., 2014). Selon Obassi (1994), près de 1,3 milliards de personnes y sont mortes de causes directes ou indirectes du phénomène. Il est ainsi certain que la détermination opportune du niveau de sécheresse permettrait d'accompagner le processus de prise de décisions dans ses objectifs de réduction des impacts..

Au cours d'une période de sécheresse, il est souhaitable de connaître la probabilité de la persistance de la sécheresse jusqu'à l'arrivée des pluies (Sharma et Panu, 2010). Son évaluation et sa prévision fournissent des renseignements précieux aux planificateurs des ressources en eau et aux décideurs politiques afin qu'ils puissent faire face, à temps, aux conséquences. En raison de la relation complexe entre les différents facteurs physiques qui participent à l'occurrence et à la persistance de la sécheresse, il n'est pas aisé de donner une définition précise de celle-ci (Soro et al., 2014). A cela s'ajoute pour les décideurs et les planificateurs des ressources en eau l'ampleur des difficultés à reconnaître et à les planifier. Notons toutefois, que la gestion de la sécheresse repose sur des indices statistiques qui, fort heureusement, permettent d'indiquer le début de la mise en œuvre des mesures de conservation de l'eau ou d'atténuation du phénomène (Khadr et al., 2009).

Les sécheresses sont généralement classées en quatre catégories (Wilhite et Glantz, 1985; American Meteorological Society, 2004) : météorologique, hydrique, agricole, socio-économique. Ces sécheresses peuvent être quantifiées en utilisant plusieurs indices dont les plus populaires sont : l'indice Palmer (Palmer, 1965), l'indice de l'approvisionnement en eau de surface (Shafer et Dezman, 1982), l'indice

standardisé de précipitation (McKee *et al.*, 1993), l'indice de sécheresse effective (Byun et Wilhite, 1999), l'indice de sécheresse des débits (Nalbantis et Tsakiris, 2009), l'indice hydrologique normalisé (Sharma et Panu, 2010), l'indice normalisé de l'évapotranspiration maximale (Vicente-Serrano *et al.*, 2010), l'indice régional de la zone de sécheresse (Fleig *et al.*, 2011), l'indice agricole de référence de la sécheresse (Woli *et al.*, 2012) etc., chaque indice ayant ses propres forces et faiblesses (Mishra et Singh, 2010).

Les précipitations ont été couramment utilisées pour l'analyse de la sécheresse météorologique (Santos, 1983 ; Chang, 1991 ; Eltahir, 1992). Considérant la sécheresse comme le déficit de précipitations par rapport à des valeurs moyennes (Gibbs, 1975), plusieurs études ont analysé les sécheresses en utilisant les données de précipitations mensuelles. D'autres approches analysent la durée de la sécheresse et de l'intensité par rapport à la pénurie de précipitations cumulées (Chang et Kleopa, 1991; Estrela *et al.*, 2000). La sécheresse météorologique caractérisée dans la présente étude est définie comme une absence de précipitations sur une zone pour une période de temps donnée.

Pour caractériser l'ampleur et l'intensité des sécheresses météorologiques au Sénégal, des indices des sécheresses météorologiques, très simples et efficaces tels que l'indice standardisé de précipitation (Nalbantis et Tsakiris, 2009) ont été utilisés. A cet indice populaires dans la caractérisation de la sécheresse météorologique et largement utilisé à travers le monde pour l'analyse de la sécheresse (Pashiardis et Michaelides, 2008; Ibrahim *et al.*, 2010 ; Sharma et Panu, 2010 ; Tirandaz et Eslami, 2012 ; Jacobi *et al.*, 2013 ; Jouilil *et al.*, 2013 ; Mirabbasi *et al.*, 2013 ; Soro *et al.*, 2014), sont associés, dans ce travail, l'indice de déficit pluviométrique (Bhalme et Mooley, 1979), l'indice des anomalies pluviométriques (Van Rooy, 1965 ; Loukas *et al.*, 2003) et l'indice logarithme décimal des déviations pluviométriques (Stângă, 2009).

Ces trois indices standardisés ont été choisis parce qu'ils permettent d'évaluer la sécheresse météorologique sur des échelles de temps différentes, de mesurer les anomalies de la pluie récente pour une zone, de placer les conditions

actuelles dans une perspective historique (Loukas *et al.*, 2003) et de faire des représentations spatiales et temporelles des sécheresses. En outre, ils exigent des données limitées pour leur calcul (uniquement les précipitations), sont largement utilisés pour une grande variété d'applications et ont été appliqués avec succès dans différentes régions climatiques. Enfin, ces trois indices présentent des avantages en termes de cohérence statistique, et ont la capacité de décrire, à travers différentes échelles de temps (court, moyen et long termes) les impacts de la sécheresse en question.

Dans ce contexte climatique d'augmentation éventuelle de l'occurrence et des impacts des sécheresses dans les années à venir (Watson *et al.*, 1997), il est indispensable de proposer aux populations des mesures d'atténuation ou d'adaptation (Soro *et al.*, 2014). C'est dans ce cadre que la présente étude a été initiée au Sénégal. Son objectif est de caractériser la durée, l'intensité et la fréquence du phénomène de sécheresse sur chacune des deux variantes des trois domaines climatiques du Sénégal, pour la période 1950-2014, à travers des indices normalisés et sur des pas de temps différents. Ces indices ont été utilisés pour évaluer la sécheresse au Sénégal sur de courtes durées (applications pour l'agriculture) et sur des durées plus longues (applications pour la gestion des ressources en eau).

2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude, le Sénégal, pays bordier de l'Atlantique nord, est situé dans l'extrême ouest du continent africain, entre les longitudes 11°21 et 17°32 Ouest et les latitudes 12°8 et 16°41 Nord (Figure 1). Il s'étend sur une superficie de 196.722 km². Situé dans la zone tropicale, le Sénégal a un climat soudano-sahélien avec une pluviométrie annuelle variant en moyenne entre environ 1.250 mm au Sud à un peu plus de 200 mm au Nord. Ce climat est marqué par une alternance entre une saison des pluies et une saison sèche. La saison des pluies, période où se manifeste la mousson, s'étend grossièrement de juin à octobre avec un pic en août-septembre. La pluie varie de manière dégressive en fonction de la latitude. La saison sèche qui dure de novembre à juin est

marquée par la présence d'un vent chaud et sec : l'harmattan. Les températures les plus élevées sont observées pendant l'été de l'hémisphère, lors de la saison des pluies, et les plus basses au mois de janvier. Sur le littoral, l'océan apporte de la fraîcheur et les températures sont de l'ordre de

16 °C à 30 °C, tandis qu'au centre et à l'Est du pays, elles peuvent atteindre 41 °C en moyenne maximale.

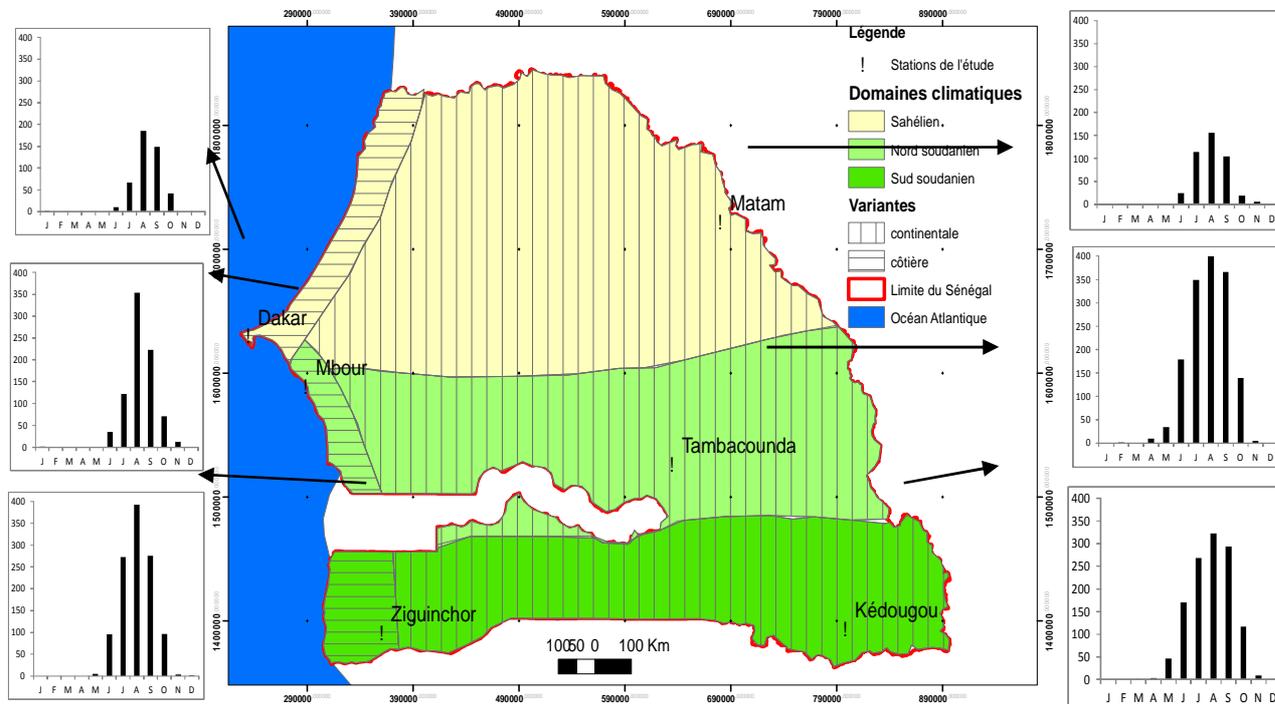


Fig. 1. Localisation des domaines climatiques du Sénégal et des stations de l'étude.

Fig.1. Localization of the climatic domains of Senegal and study stations.

Les grands traits climatiques du Sénégal sont le résultat conjoint de facteurs géographiques et aérologiques (Leroux, 1983 ; Sagna, 2005). Les premiers s'expriment par la latitude qui confère au territoire des caractères tropicaux, et par la position de « Finistère ouest-africain » qui détermine des conditions climatiques différentes sur le littoral et à l'intérieur. Les seconds s'expriment par l'alternance sur le pays de trois flux dont les déplacements sont facilités par la platitude du relief. Compte tenu des variations de la pluviométrie dans l'espace et dans le temps, on distingue au Sénégal, du Sud au Nord, trois domaines climatiques que sont les domaines sud soudanien, nord soudanien et sahélien, chaque domaine connaissant deux variantes (une côtière et une continentale) (Figure 1).

3. DONNEES ET METHODES

3.1. Données

Les données de base sont constituées de relevés pluviométriques sur 50 années (1963-2012) provenant de six stations (Tableau 1) localisées dans les trois domaines climatiques (Sud et Nord soudanien et sahélien) suivant une répartition de deux stations par domaine (une sur la variante continentale et une autre sur celle côtière). Ce choix a été effectué de manière à permettre une couverture la plus homogène possible de la zone d'étude. Les données ont été mises à notre disposition par l'Agence Nationale de la Climatologie et de l'Aviation Civile (ANACIM) du Sénégal. Les six stations obéissent à des critères de continuité, de durée de l'information disponible et de qualité des données (toutefois, six stations restent non représentatives pour 196.000 km²).

Tableau 1. Postes pluviométriques au Sénégal retenus pour l'étude et de leurs caractéristiques.

Table 1. Rainfall stations selected in Senegal for the study and their characteristics.

Domaines	Variantes	Stations	Latitudes (° décimaux)	Longitudes (° décimaux)	Altitudes (m)	Périodes
Sud soudanien	côtière	Ziguinchor	12,55	-16,27	26	1963-2012
	continentale	Kédougou	12,57	-12,22	178	1963-2012
Nord soudanien	côtière	Mbour	14,42	-16,97	10	1963-2012
	continentale	Tambacounda	13,77	-13,68	49	1963-2012
Sahélien	côtière	Dakar	14,73	-17,50	27	1963-2012
	continentale	Matam	15,65	-13,25	15	1963-2012

3.2. Methodes

3.2.1. Indice des anomalies pluviométriques (IAP)

L'indice des anomalies pluviométriques, proposé en 1965 par Van Rooy, (1965) mentionné par Loukas *et al.*, (2003), peut être utilisé dans de nombreuses zones climatiques. Conformément à la méthodologie, les données climatologiques doivent être ordonnées pour mettre en évidence les anomalies positives et négatives. L'équation de calcul a la forme suivante :

$$IAP = \frac{(P_i - P_m)}{(E_m - P_m)}$$

Avec P_i : la pluie de l'année i ; P_m : la pluie moyenne de la série sur l'échelle temporelle considérée et E_m : la moyenne des dix valeurs extrêmes (négatives ou positives).

Pour les anomalies positives, le préfixe est positif et E_m est la moyenne des 10 valeurs les plus élevées sur la série des précipitations, tandis que pour les anomalies négatives, le préfixe est négatif et E_m est la moyenne des 10 mesures les plus basses de la série. L'IAP nous fournit une caractérisation pluviométrique pour des pas de temps de calcul différents et ses valeurs sont évaluées selon un système de classification donnée dans le Tableau 2

Tableau 2. Classification des séquences de sécheresse selon l'IAP.

Table 2. Classification of drought sequences according to IAP.

Valeurs de l'ILP	Séquences de sécheresses	Valeurs de l'ILP	Séquence humides
00 < IAP < -1,0	En limites normales	00 < IAP < 1,0	En limites normales
-1,0 < IAP < -2,0	Peu sèche	1,0 < IAP < 2,0	Peu pluvieuse
-2,0 < IAP < -3,0	Modérément sèche	2,0 < IAP < 3,0	Modérément pluvieuse
-3,0 < IAP < -4,0	Fortement sèche	3,0 < IAP < 4,0	Très pluvieuse
IAP < -4,0	Excessivement sèche	IAP > 4,0	Excessivement pluvieuse

3.2.2. Indice logarithme décimal des déviations pluviométriques (IDP)

Le pourcentage des pluies représente peut-être la plus simple méthode employée pour exprimer le déficit pluviométrique d'une période par le rapport entre les pluies effectives et la moyenne pluriannuelle pour cette période (Stângă, 2009). Comme l'expression graphique du rapport n'est pas suffisamment suggestive pour nuancer les déviations maximales, l'indice logarithme décimal

des déviations pluviométrique (IDP) est calculé de la manière suivante :

$$IDP = \log (P_i / P_m)$$

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

L'IDP met beaucoup mieux en évidence l'excédent ou le déficit pluviométrique avec une bonne tendance à mettre en évidence les extrêmes positives ou négatives. On effectue une

classification de la sécheresse suivant les valeurs de l'IDP (Tableau 3).

Tableau 3. Classification des séquences de sécheresse selon l'IDP.

Table 3. Classification of drought sequences according to IDP.

Valeurs de l'IDP	Séquences de sécheresses	Valeurs de l'IDP	Séquences humides
0,00 < IDP < -0,99	Modérément sèche	0,00 < IDP < 0,99	Modérément humide
-1,00 < IDP < -1,99	Fortement sèche	1,00 < IDP < 1,99	Fortement humide
IDP < -2,00	Extrêmement sèche	2,00 < IDP	Extrêmement humide

3.2.3. Indice standardise de précipitations (ISP)

L'indice standardisé des précipitations (McKee et al., 1993 ; Hayes, 1996) a été développé en vue de quantifier le déficit pluviométrique pour des échelles de temps multiples. Adopté en 2009 par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) comme un instrument mondial pour mesurer les sécheresses météorologiques, aux termes de la « Déclaration de Lincoln sur les indices de sécheresse » (Jouilil et al., 2013). Il est exprimé mathématiquement comme suit :

$$ISP = \frac{(P_i - P_m)}{S}$$

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

Une sécheresse sévit lorsque l'ISP est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins, et se termine lorsque l'ISP devient positif. On effectue une classification de la sécheresse suivant les valeurs de l'ISP (Tableau4)

Tableau 4. Classification des séquences de sécheresse selon l'ISP.

Table 4. Classification of drought sequences according to ISP.

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

3.2.4. Durée, fréquence et intensité des séquences de sécheresse

Pour étudier la sécheresse, il est important de caractériser sa durée (à partir du début et de la fin d'une séquence de sécheresse), son intensité et sa fréquence.

- ✓ La durée maximale des séquences de sécheresse : La durée maximale (D) qui est une caractéristique importante de la sécheresse est choisie dans la présente étude pour caractériser la durée des séquences sèches. Le calcul de la durée se fait comme suit :

$$D = (A_{fin} - A_{début}) + 1$$

Avec : A_{fin} : Année de la fin de la période sèche ;
 $A_{début}$: Année du début de la période sèche ;

- ✓ La fréquence des séquences de sécheresse : La fréquence cumulée de sécheresse (F) donne une idée sur l'occurrence des séquences sèches sur une période d'étude. Elle est obtenue par :

$$F = \frac{\int n}{N} \times 100$$

Avec : $\int n$: effectif cumulé des séquences sèches ;
 N : effectif total de la série étudiée.

- ✓ L'intensité des séquences de sécheresse : L'intensité de la sécheresse indique l'ampleur et la gravité du déficit pluviométrique. Sur cette étude, la valeur extrême de l'ISP, de l'IDP et de l'IAP est

évaluée et considérée comme la valeur de référence de l'intensité de la sécheresse.

3.2.5. Echelles de caractérisation de la sécheresse météorologique

Le calcul de la sécheresse météorologique (déficit pluviométrique) est effectué sur sur trois échelles de temps différentes (court, moyen et long terme) :

- ✓ Pour la sécheresse météorologique à court terme, la pluie moyenne de la série utilisée sur les méthodes de calcul des indices est calculée sur une échelle de temps de 5 ans ;
- ✓ Pour la sécheresse météorologique à moyen terme, la pluie moyenne de la série utilisée sur les méthodes de calcul des indices est calculée une échelle de temps de 25 ans) ;
- ✓ Pour la sécheresse météorologique à long terme (la pluie moyenne de la série utilisée sur les méthodes de calcul des indices est calculée une échelle de temps de 50 ans).

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Résultats

4.1.1. Sécheresse météorologique a court terme (échelle de temps de 5 ans)

Les résultats de l'analyse de la sécheresse météorologique à court terme (échelle de temps de calcul de 5 ans) sont présentés dans le tableau 5 et sur la figure 2. Avec l'indice standardisé de précipitations (ISP), la sécheresse légère enregistre les fréquences les plus importantes (supérieures à 30%) sur les différents domaines climatiques et stations étudiées (le maximum est noté à Mbour avec 46%). Elle est suivie par la sécheresse

modérée dont le maximum est noté à Matam (16%). Les fréquences de la sécheresse sévère sont partout notées mais sont très faibles. Le constat est le même avec l'indice des anomalies pluviométriques (IAP) qui indiquent de fortes fréquences aux séquences de sécheresse les plus faibles (valeurs atteignant 48% à Ziguinchor), tandis qu'elles sont très faibles à nulles pour la sécheresse forte sur les différents domaines climatiques et stations étudiés. Pour l'indice logarithme décimal des déviations pluviométrique (IDP), contrairement à l'ISP et l'IAP, la sécheresse modérée a le caractère le plus faible de la sécheresse et enregistre des fréquences supérieures à 50% sur les différents domaines climatiques et stations étudiés (58% à Mbour et Dakar). Tout comme l'ISP et l'IAP, l>IDP enregistre pour les séquences fortement sèches de la sécheresse des fréquences très faibles à nulles (seules les fréquences de Mbour et Dakar ne sont pas nulles).

L'analyse de la figure 2 montre une alternance de séquences sèches et humides sur toute la période 1963-2012, quels que soient l'indice, le domaine climatique et la station considérés, tandis que le nombre de séquences sèches est plus important sur les décennies de sécheresse (1970 et 1980). Toutefois, les séquences consécutives de sécheresse (4 années à Ziguinchor ; 3 à Kédougou et Matam ; 6 à Mbour ; 5 à Tambacounda et Dakar) sont faibles. L'échelle court terme (échelle de temps de calcul de 5 ans) n'a donc pas véritablement distingué les périodes humides (décennie 60) et plus ou moins humides (décennie 2000) des décennies de sécheresse (1970 et 1980). Ainsi donc, l'alternance de séquences sèches et humides sur toutes les séries, même pour la période dite humide, montre des insuffisances de l'échelle de temps de calcul de 5 ans pour caractériser la sécheresse météorologique.

Tableau 5. Fréquences (en %) des indices de sécheresses pour la période 1963-2012 à courte durée.

Table 5. Frequencies (%) of drought indices for the period 1963-2012 with short-term duration.

Indice des anomalies pluviométriques (IAP)						
	Ziguinchor	Kédougou	Mbour	Tambacounda	Dakar	Matam
En limites normales	48	44	54	40	40	40
Peu sèche	4	4	6	10	10	10
Modérément sèche	2	0	0	0	0	0
Fortement sèche	0	2	0	0	0	0
Excessivement sèche	0	0	0	0	0	0
Indice logarithme décimal des déviations pluviométriques (IDP)						
	Ziguinchor	Kédougou	Mbour	Tambacounda	Dakar	Matam
Modérément sèche	54	50	58	50	48	50
Fortement sèche	0	0	2	0	2	0
Extrêmement sèche	0	0	0	0	0	0
Indice standardisé de précipitations (ISP)						
	Ziguinchor	Kédougou	Mbour	Tambacounda	Dakar	Matam
Légèrement sèche	40	38	46	34	36	32
Modérément sèche	12	8	14	14	12	16
Sévèrement sèche	2	4	0	2	2	2
Extrêmement sèche	0	0	0	0	0	0

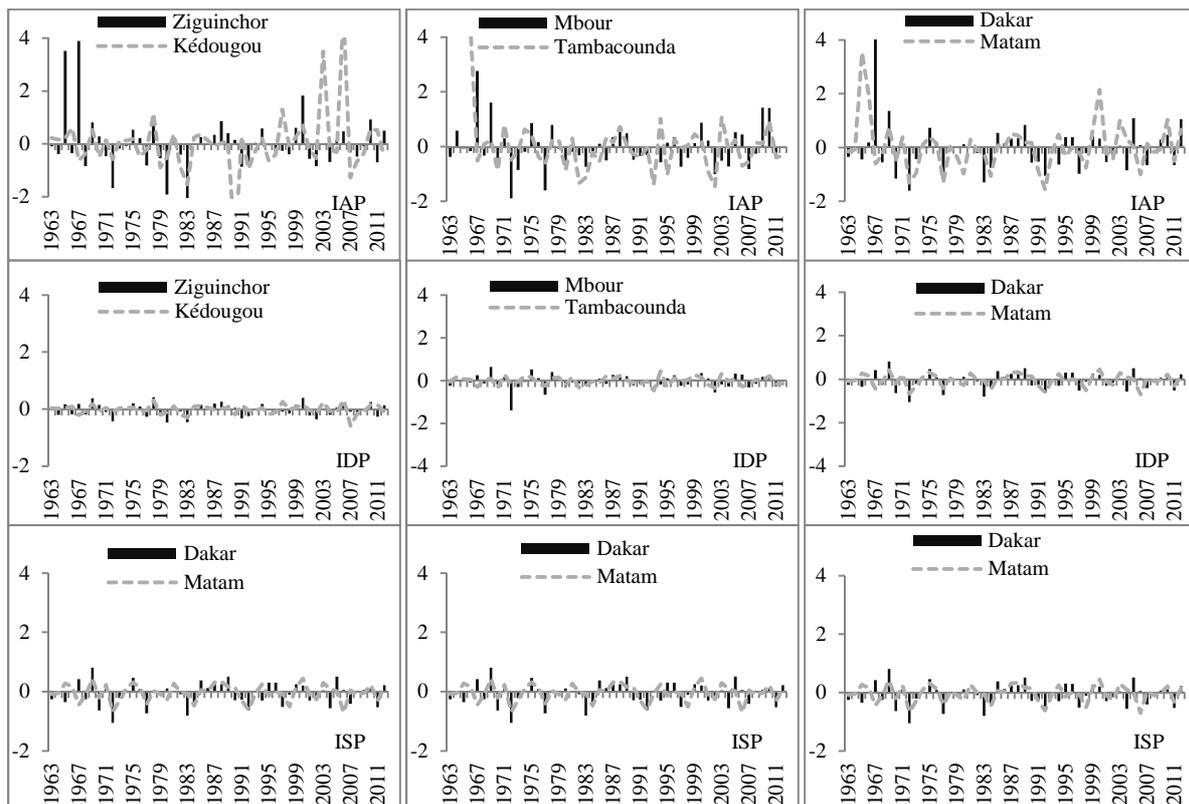


Fig. 2. Evolution de la sécheresse à courte durée à l'aide de l'IAP, l'IDP et l'ISP de 1963 à 2012.

Fig.2. Evolution of short-term drought using IAP, IDP and ISP from 1963 to 2012.

4.1.2. Sécheresse météorologique a moyen terme (échelle de temps de 25 ans)

Les résultats de l'analyse de la sécheresse météorologique à moyen terme (échelle de temps

de calcul de 25 ans) sont donnés dans le tableau 6 et la figure 3. Tous les trois indices statistiques calculés indiquent d'abord des séquences humides de 1963 à 1970, ensuite des séquences sèches de

1970 jusqu'en 1999. Par contre, de 2000 à 2012, il est noté une alternance de séquences sèches et humides.

Tableau 6. Fréquences (en %) des indices de sécheresses pour la période 1963-2012 à moyenne durée.

Table 6. Frequencies (%) of drought indices for the period 1963-2012 with medium duration.

Indice des anomalies pluviométriques (IAP)						
	Ziguinchor	Kédougou	Mbour	Tambacounda	Dakar	Matam
En limites normales	50	48	50	46	46	46
Peu sèche	6	6	6	10	10	10
Modérément sèche	0	0	0	0	0	0
Fortement sèche	0	0	0	0	0	0
Excessivement sèche	0	0	0	0	0	0
Indice logarithme décimal des déviations pluviométriques (IDP)						
	Ziguinchor	Kédougou	Mbour	Tambacounda	Dakar	Matam
Modérément sèche	56	54	54	56	54	56
Fortement sèche	0	0	2	0	2	0
Extrêmement sèche	0	0	0	0	0	0
Indice standardisé de précipitations (ISP)						
	Ziguinchor	Kédougou	Mbour	Tambacounda	Dakar	Matam
Légèrement sèche	40	42	42	38	40	38
Modérément sèche	12	8	12	14	14	14
Sévèrement sèche	4	4	2	4	2	4
Extrêmement sèche	0	0	0	0	0	0

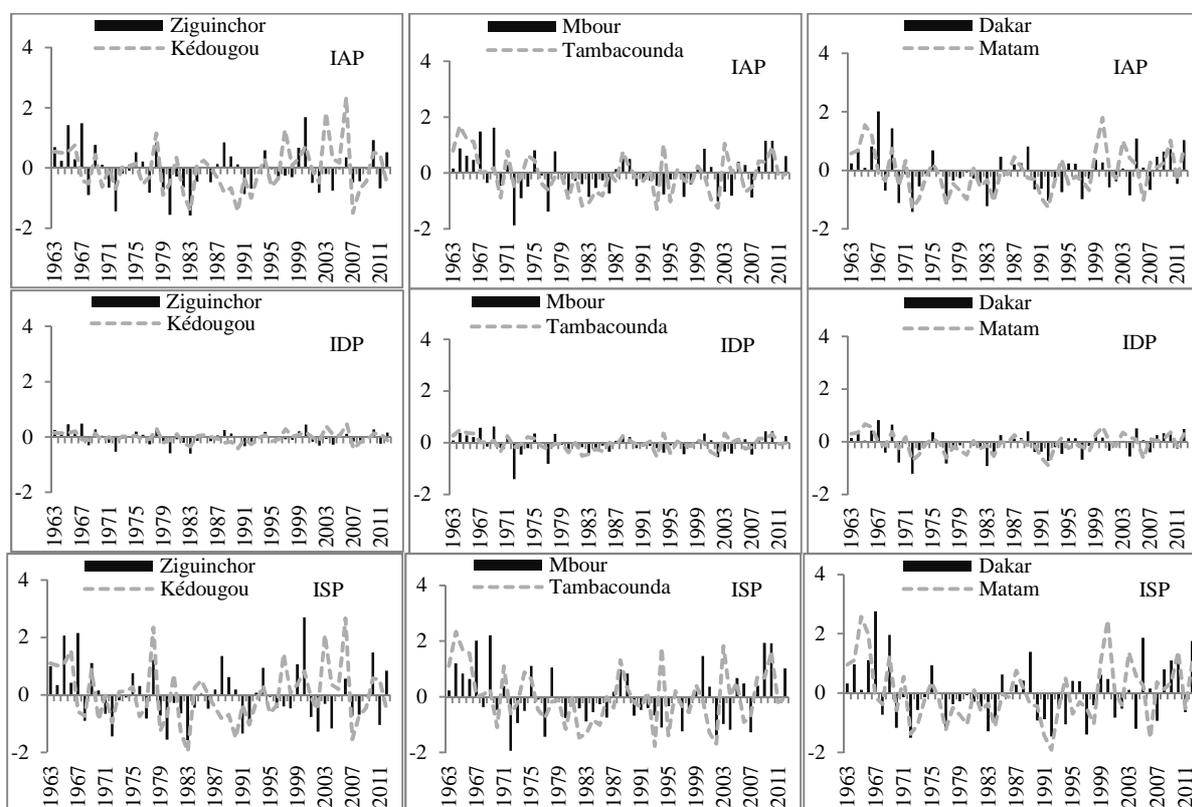


Fig. 3. Evolution de la sécheresse à moyenne durée à l'aide de l'IAP, l'IDP et l'ISP de 1963 à 2012.

Fig.3. Evolution of medium-term drought using IAP, IDP and ISP from 1963 to 2012.

La figure 3 montre que durant la période 1970 à 1999, des séquences consécutives de sécheresse (6 années à Ziguinchor ; 8 à Kédougou et Mbour ; 4 à Tambacounda ; 9 à Dakar ; 5 à Matam) plus longues ont été enregistrées. A partir de 1999, la sécheresse météorologique s'est fait aussi ressentir avec, toutefois, un nombre moins important sur les stations. Les périodes humides (décennie 1960) et plus ou moins humides (décennie 2000) sont distinguées des décennies de sécheresse (1970 et 1980) par l'échelle moyen terme (échelle de temps de calcul de 25 ans). Ainsi, cette échelle est plus adaptée que le court terme (échelle de temps de calcul de 5 ans) pour la caractérisation de la sécheresse météorologique.

Sur les différents domaines climatiques et stations étudiés, l'indice standardisé de précipitations (ISP) indique des fréquences très importantes sur les séquences légèrement sèches (entre 38 et 42%) modestes sur les séquences modérément sèches (entre 8 et 14%) et très faibles sur les séquences sévèrement sèches (entre 2 et 4%). Pour l'indice des anomalies pluviométriques (IAP), seules des séquences très peu sèches (entre 48 et 50%) et peu sèches (entre 6 et 10%) sont notées. Pour l'indice logarithme décimal des déviations pluviométrique (IDP), les séquences de sécheresse modérée enregistrent des fréquences supérieures à 50% sur les différents domaines climatiques et stations étudiés (56% à Ziguinchor, Tambacounda et Matam). Les séquences fortement sèches n'apparaissent qu'à Mbour et Dakar (2% chacune).

4.1.3 Sécheresse météorologique a long terme (échelle de temps de 50 ans)

A long terme (échelle de temps de calcul de 50 ans), les résultats de l'analyse de la sécheresse hydrologique sont donnés dans le tableau 7 et la figure 4. Les trois indices utilisés pour l'évaluation des déficits pluviométriques de 1963 à 2012

montrent une importante fluctuation des périodes sèches et humides avec une forte tendance à la sécheresse, notamment sur la période 1970-1999. La période de sécheresse la plus longue qui affecte le Sénégal s'étale généralement de 1970 à 1999.

Les fréquences des indices sur les différents domaines climatiques et stations étudiés à l'échelle long terme (échelle de temps de calcul de 50 ans) sont assez proches de celles à moyen terme (échelle de temps de calcul de 25 ans). Elles sont néanmoins plus significatives. Avec l'indice standardisé de précipitations (ISP), au-delà, des fréquences très importantes des séquences légèrement sèches (de 36 à 44%), modestes sur les séquences modérément sèches (de 6 à 12%) et très faibles des séquences sévèrement sèches (de 2 à 6%), une fréquence de 2% est même notée pour les séquences extrêmement sèches. Comme à moyen terme (échelle de temps de calcul de 25 ans), l'indice des anomalies pluviométriques (IAP) n'enregistre que des séquences très peu sèches (de 44 à 50%) et peu sèches (6% à Ziguinchor, Kédougou et Mbour ; 10% à Tambacounda, Dakar et Matam). Pour l'indice logarithme décimal des déviations pluviométrique (IDP), les séquences de sécheresse modérée sont maximales avec des fréquences dépassant 50% sur les stations étudiées (58% à Matam ; 56% à Kédougou ; 54% à Dakar et Tambacounda). Toujours, des séquences fortement sèches ne sont présentes qu'à Mbour et Dakar avec de très faibles fréquences (2%).

La figure 4 montre que, durant la période 1970 à 1999, il y a des séquences consécutives de sécheresse plus longues, comparées aux échelles court et moyen termes (échelle de temps de calcul de 5 et 25 ans) (8 années à Ziguinchor, Kédougou et Mbour ; 4 à Tambacounda ; 9 à Dakar ; 11 à Matam). Ainsi, cette échelle est plus apte que les court et moyen termes, à caractériser la sécheresse météorologique.

Tableau 7. Fréquences (en %) des indices de sécheresses pour la période 1963-2012 à long terme.

Table 7. Frequencies (in%) of drought indices for the period 1963-2012 with long-term duration.

Indice des anomalies pluviométriques (IAP)						
	Ziguinchor	Kédougou	Mbour	Tambacounda	Dakar	Matam
En limites normales	46	50	48	44	46	48
Peu sèche	6	6	6	10	10	10
Modérément sèche	0	0	0	0	0	0
Fortement sèche	0	0	0	0	0	0
Excessivement sèche	0	0	0	0	0	0
Indice logarithme décimal des déviations pluviométriques (IDP)						
	Ziguinchor	Kédougou	Mbour	Tambacounda	Dakar	Matam
Modérément sèche	52	56	52	54	54	58
Fortement sèche	0	0	2	0	2	0
Extrêmement sèche	0	0	0	0	0	0
Indice standardisé de précipitations (ISP)						
	Ziguinchor	Kédougou	Mbour	Tambacounda	Dakar	Matam
Légèrement sèche	40	44	40	36	42	42
Modérément sèche	6	6	10	12	12	12
Sévèrement sèche	6	6	2	6	2	4
Extrêmement sèche	0	0	2	0	0	0

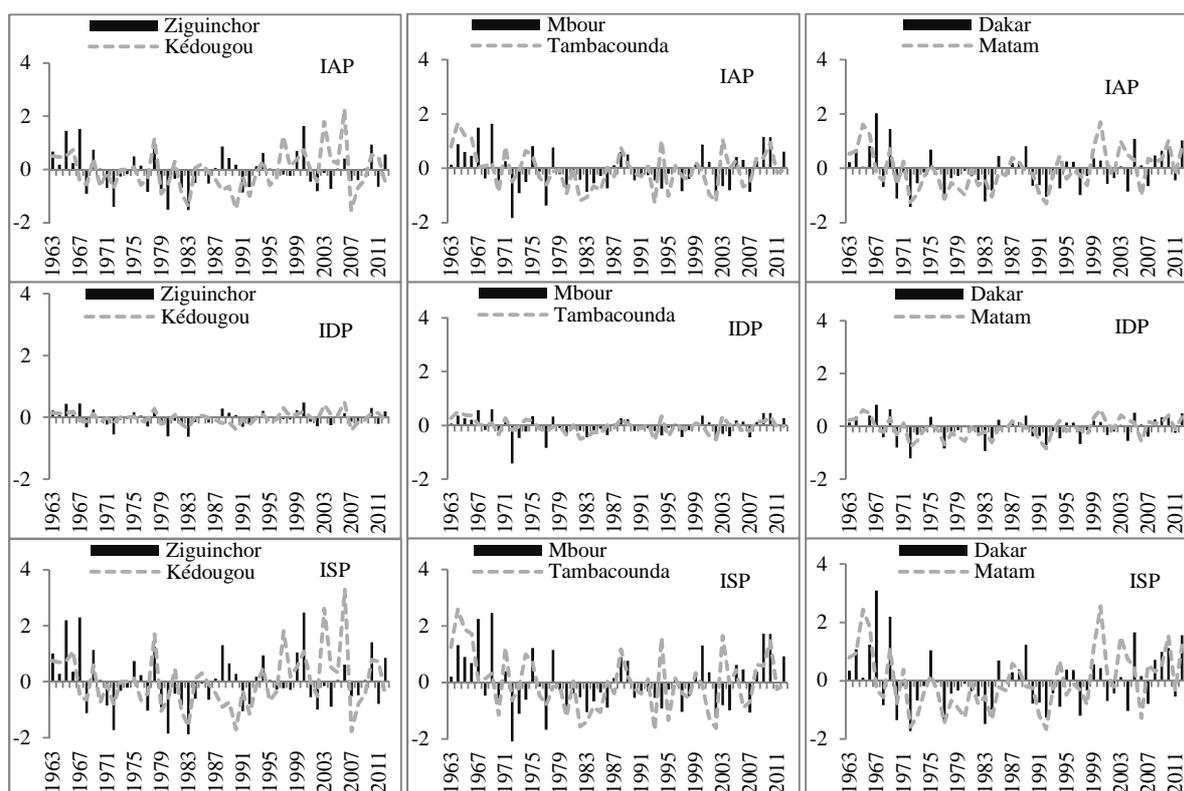


Fig. 4. Evolution de la sécheresse à longue durée à l'aide de l'IAP, l'IDP et l'ISP de 1963 à 2012.

Fig.4. Evolution of long-term drought using IAP, IDP and ISP from 1963 to 2012.

Les trois indices calculés montrent trois grandes périodes :

- La première période (de 1963 à 1970) avec des indices positifs correspondant à la période humide de la décennie 1960 ;
- La deuxième période (de 1970 à 1999) avec des indices négatifs correspondant à la période sèche des décennies 1970 et 1980 ;
- La troisième période (de 1999 à 2012) avec des indices alternant positifs et négatifs correspondant à la période plus ou moins humide de la décennie 2000. Sur cette troisième période, l'actuelle, peu de séquences sèches ont été détectées à long terme (échelle de temps de calcul de 50 ans) sur les stations étudiées.

Ainsi un nouveau changement important du régime pluviométrique s'est encore enclenché au tournant du siècle comme indiqué par certains travaux (Ali et Lebel, 2009 ; Ozer *et al.*, 2009 ; Ouoba, 2013 ; Panthou *et al.*, 2014 ; Bodian, 2014) qui suggèrent la fin de la sécheresse sahélienne durant les années 1990. Notons toutefois que cette période est qualifiée par les spécialistes de la question de période de « retour apparent » de la pluviométrie, sachant que l'optimum des années 60 n'est pas encore atteint même s'il a été noté un accroissement des totaux annuels.

4.1.4. Analyse de la durée, la fréquence et l'intensité des séquences de sécheresse

L'analyse de la durée, de la fréquence et de l'intensité des séquences de sécheresse est basée sur les résultats du tableau 8. Sur la période 1964-2012 analysée, les sécheresses les plus remarquables de par leur intensité sont variables mais, elles sont généralement notées durant les années 1970 et 80 et pour toutes les échelles : court, moyen et long termes (échelle de temps de calcul de 5, 25 et 50 ans). De plus, les caractères des séquences de sécheresses les plus remarquables varient en fonction des indices. L'intensité maximale est notée en 1972 à Mbour (avec un ISP extrêmement sec de -2,24 à long terme (échelle de temps de calcul de 50 ans) et Dakar (avec un ISP sévèrement sec de -1,72 à long

terme à Ziguinchor, en 1983 (avec un ISP sévèrement sec de -1,88 à long terme et plus tardivement à Matam (1992), Tambacounda (1993) et surtout Kédougou (2007). Les épisodes secs maximaux détectés ont été qualifiés généralement de sévèrement secs en termes d'intensité avec l'ISP quels que soient l'échelle, le domaine climatique et la station choisie (seule la station de Mbour a une séquence extrêmement sèche à long terme. En revanche, avec l'IAP, les séquences des sécheresses les plus remarquables sont totalement peu sèches. En outre, pour l'IDP, les séquences des sécheresses les plus remarquables sont généralement des sécheresses modérées (seule la station de Dakar enregistre des séquences fortement sèches). De façon générale, les sécheresses les plus remarquables de par leur intensité ont été celles des années 1972 et 1983, et les stations situées au Nord du Sénégal ont été les plus affectées en termes d'intensité quelle que soit l'échelle de temps considérée.

L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre que celle-ci peut varier d'une échelle de temps à une autre, d'une station à une autre, d'un indice à un autre (Tableau 8). A court terme (échelle de temps de calcul de 5 ans), les séquences consécutives de sécheresse sont les plus faibles et varient de 3 à 6 ans : 3 à Kédougou (2007-09) et Matam (1982-84) ; 4 à Ziguinchor (1971-74) ; 5 à Tambacounda (1982-85) et Dakar (1990-94) ; 6 à Mbour (1979-84). A moyen terme (échelle de temps de calcul de 25 ans), le nombre de séquences consécutives de sécheresse connaît une hausse et varie de 4 à 9 : 4 à Tambacounda (1982-85) ; 5 à Matam (1976-80) ; 6 à Ziguinchor (1979-84) ; 8 à Kédougou (1986-93) et Mbour (1979-86) ; 9 à Dakar (1976-84). Enfin à long terme (échelle de temps de calcul de 50 ans), les séquences consécutives de sécheresse sont semblables à celles à moyen terme pour les stations de Kédougou, Mbour, Tambacounda et Dakar, et différentes pour les stations de Ziguinchor (8 années : 1979-86) et de Matam (11 années : 1976-86). De toutes les stations et aux trois échelles, la station de Matam, au Nord du pays a connu la plus longue période de sécheresse avec 11 années de séquences sèches consécutives.

Tableau 8. Intensité, durée et fréquences des séquences de sécheresses enregistrées sur la période 1963-2012 à courte, moyenne et longue durées.

Table 8. Intensity, duration and frequencies of drought sequences recorded over the period 1963-2012 at short, medium and long durations.

Ziguinchor	INTENSITE					DUREE MAXIMALE (ANS)			FREQUENCE CUMULEES		
	Variables	IAP	IDP	ISP	Années	IAP	IDP	ISP	IAP	IDP	ISP
Court terme	Intensité	-1,52	-0,47	-1,62	1983	4 (1971-74)	4 (1971-74)	4 (1971-74)	54	54	54
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		6 (1979-84)	6 (1979-84)	6 (1979-84)	56	60	56
Moyen terme	Intensité	-1,58	-0,60	-1,57							
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		8 (1979-86)	8 (1979-86)	8 (1979-86)	52	52	52
Long terme	Intensité	-1,52	-0,62	-1,88							
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		
Kédougou	INTENSITE					DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		
	Variables	IAP	IDP	ISP	Années	IAP	IDP	ISP	IAP	IDP	ISP
Court terme	Intensité	-1,53	-0,59	-1,73	2007	3 (2007-09)	3 (2007-09)	2 (1976-77)	50	50	50
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		8 (1986-93)	8 (1986-93)	8 (1986-93)	54	56	54
Moyen terme	Intensité	-1,49	-0,44	-1,96							
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		8 (1986-93)	8 (1986-93)	8 (1986-93)	56	56	56
Long terme	Intensité	-1,53	-0,42	-1,77							
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		
Mbour	INTENSITE					DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		
	Variables	IAP	IDP	ISP	Années	IAP	IDP	ISP	IAP	IDP	ISP
Court terme	Intensité	-1,83	-1,39	-1,33	1972	6 (1979-84)	6 (1979-84)	4 (1979-84)	60	60	60
	Type	Peu sè.	Mod.	Mod.		8 (1979-86)	8 (1979-86)	8 (1979-86)	56	60	56
Moyen terme	Intensité	-1,86	-1,40	-1,94							
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		8 (1979-86)	8 (1979-86)	8 (1979-86)	54	54	54
Long terme	Intensité	-1,83	-1,42	-2,24							
	Type	Peu sè.	Mod.	Ext.		DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		
Tambacounda	INTENSITE					DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		
	Variables	IAP	IDP	ISP	Années	IAP	IDP	ISP	IAP	IDP	ISP
Court terme	Intensité	-1,28	-0,47	-1,54	1993	5 (1982-85)	5 (1982-85)	4 (1982-85)	50	50	50
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		4 (1982-85)	4 (1982-85)	4 (1982-85)	56	60	56
Moyen terme	Intensité	-1,29	-0,54	-1,76							
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		4 (1982-85)	4 (1982-85)	4 (1982-85)	54	54	54
Long terme	Intensité	-1,28	-0,55	-1,68							
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		
Dakar	INTENSITE					DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		
	Variables	IAP	IDP	ISP	Années	IAP	IDP	ISP	IAP	IDP	ISP
Court terme	Intensité	-1,42	-1,05	-1,65	1972	5 (1990-94)	5 (1990-94)	5 (1990-94)	50	50	50
	Type	Peu sè.	Fort.	Sév.		9 (1976-84)	9 (1976-84)	9 (1976-84)	56	60	56
Moyen terme	Intensité	-1,42	-1,21	-1,50							
	Type	Peu sè.	Fort.	Sév.		9 (1976-84)	9 (1976-84)	9 (1976-84)	56	56	56
Long terme	Intensité	-1,42	-1,22	-1,72							
	Type	Peu sè.	Fort.	Sév.		DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		
Matam	INTENSITE					DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		
	Variables	IAP	IDP	ISP	Années	IAP	IDP	ISP	IAP	IDP	ISP
Court terme	Intensité	-1,30	-0,70	-1,63	1992	3 (1982-84)	3 (1982-84)	3 (1982-84)	50	50	50
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		5 (1976-80)	5 (1976-80)	5 (1976-80)	56	58	56
Moyen terme	Intensité	-1,28	-0,90	-1,91							
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		11 (1976-86)	11 (1976-86)	11 (1976-86)	58	58	58
Long terme	Intensité	-1,30	-0,84	-1,66							
	Type	Peu sè.	Mod.	Sév.		DUREE MAXIMALE			FREQUENCE CUMULEES		

Ext. : Extrêmement sèche; Sév. Sévèrement sèche ; Mod. : Modérément sèche; Peu sè : Peu Sèche ; Fort. : Fortement sèche.

Les fréquences des épisodes de sécheresse observés dans le bassin sont supérieures à 50% quels que soient l'échelle de temps, l'indice et la station considérée (Tableau 8). Toutefois, à court terme, les fréquences des séquences de sécheresse sont généralement plus faibles mais constantes

pour les trois indices : 50% à Kédougou, Dakar, Tambacounda et Matam, 54% à Ziguinchor et 60 à Mbour. De même, à long terme, les fréquences des séquences de sécheresse sont variables et toujours constantes pour sur les trois indices : 52% à Ziguinchor ; 54% à Mbour et Tambacounda ; 56% à

Kédougou et Dakar ; 58% à Matam. En revanche, à moyen terme, les fréquences des séquences de sécheresse, bien qu'importantes, sont plus variables pour les trois indices et les stations. Par exemple, l'IAP et l'IDP sont respectivement de 56 et 60% à Ziguinchor, Mbour, Tambacounda et Dakar, de 54 et 56% à Kédougou, 56 et 58% à Matam. De façon générale, les stations au Nord du pays semblent les plus affectées par la fréquence des sécheresses que celles au Sud quels que soient l'échelle de temps et l'indice.

4.2. Discussion

L'analyse de l'indice logarithme décimal des déviations pluviométrique (IDP), de l'indice des anomalies pluviométriques (IAP) et de l'indice standardisé de précipitations (ISP) calculés pour des échelles de temps de 5 ans, de 25 ans et de 50 ans pour 6 stations aux régimes climatiques différents, a révélé que le Sénégal a connu un important déficit pluviométrique après 1970 avec des pics en 1972 et 1983. Ces pics ont été caractérisés par des séquences sévèrement et extrêmement sèches. Ces résultats confirment les recherches effectuées par Servat *et al.* (1999), Sighomnou (2004), Ardoin-Bardin (2004), Goula *et al.* (2005), Soro *et al.* (2014) en Afrique de l'Ouest. Ils confirment également les travaux de Dione (1996), Sagna (2005), Sow (2007) Bodian (2011), Faye (2013), Faye *et al.* (2015) qui ont montré que les décennies 1970, 1980 et 1990 ont été des périodes sèches marquées par un fort déficit pluviométrique.

Bien que la baisse pluviométrique se soit intensifiée au Sénégal au cours des années 1980 et 1990, elle n'a pas persisté dans les années 2000 comme noté d'ailleurs par certains auteurs (L'Hôte *et al.*, 2002 ; Frappart *et al.*, 2009 ; Soro *et al.*, 2014). Durant la décennie 2000, il a été noté, au Sénégal une hausse de la pluviométrie présageant l'amélioration des régimes pluviométriques dans le pays comparativement à la période de sécheresse des décennies précédentes, bien que la persistance et la durabilité de la hausse actuelle soient encore à prouver, sachant que l'échelle climatologique par excellence est la trentenaire. Toutefois, cette amélioration des conditions pluviométriques est en concordance avec les travaux de certains auteurs

(Niang, 2008 ; Ali et Lebel, 2009 ; Ozer *et al.*, 2009 ; Ouoba, 2013 ; Panthou *et al.*, 2014 ; Bodian, 2014) qui suggèrent la fin de la sécheresse sahélienne durant les années 1990. En effet, sur la période 2000-2012, les indices statistiques ont détecté au Sénégal d'importantes séquences humides même si l'optimum des années 1960 n'est pas encore atteint.

Par ailleurs, les évolutions des valeurs des trois indices ISP, IAP et IDP à court, moyen et long termes (échelle de temps de calcul de 5, 25 et 50 ans) des différentes stations montrent que le domaine climatique sud-soudanien est moins affecté par les sécheresses que le domaine climatique sahélien. En outre, dans chaque domaine climatique, la station continentale est plus touchée que la côtière. Cela pourrait être lié à la distribution spatiale de la pluie au niveau du pays, en accord avec le positionnement et la migration du front intertropical (Sagna, 2005). En effet, du fait de la position du FIT, le Sud du pays reçoit plus de précipitation que le Nord et est donc moins sujet aux épisodes secs.

Les résultats obtenus à court, moyen et long termes (échelle de temps de calcul de 5, 25 et 50 ans) varient selon la station, l'échelle de temps et l'indice. En effet, au niveau de la durée des séquences de sécheresse, les résultats obtenus sont un peu identiques à moyen et long termes (échelle de temps de calcul de 25 et 50 ans), mais différents de ceux à court terme (échelle de temps de calcul de 5 ans). Au niveau de la fréquence, les résultats obtenus sont semblables à court et long termes (échelle de temps de calcul de 5 et 50 ans), mais différent de ceux à moyen terme (échelle de temps de calcul de 25 ans). Quant à l'intensité de la sécheresse, si les résultats obtenus sont identiques (en occurrence) sur les échelles de temps et les indices ; ils sont, en revanche, différents selon la typologie. Ces analyses montrent les effets de l'échelle de temps sur la caractérisation des séquences sèches. En effet, plus le temps choisi est long (ce qui suppose, plus de données historiques), plus l'indice statistique varie peu et permet de définir avec plus de précision les épisodes secs, d'où la nécessité d'utiliser des échelles de temps long terme (échelle de temps de calcul de 50 ans) pour mieux

caractériser les séquences sèches. Ce même constat est fait par Lopez *et al.* (2006) dans l'Etat de Chihuahua au Mexique et par Soro *et al.* (2014) dans l'extrême Nord-ouest de la Côte d'Ivoire.

Dans cette étude, les séquences sèches ont été caractérisées strictement avec des données pluviométriques, une approche fortement tributaire de la qualité des données mesurées *in situ*, d'autant que le maillage des stations sur le territoire sénégalais est très lâche. Pour y remédier, d'autres auteurs (Bayarjargal *et al.*, 2006 ; Beaudin, 2007) utilisent dans leurs études l'imagerie satellitaire pour le suivi des conditions météorologiques et environnementales. Ainsi, il est redondant de signaler que la technique de combinaison des deux types de données reste l'idéal car non seulement elle offre la possibilité d'acquérir les données journalières pour un territoire désiré, mais elle augmente la précision et la surveillance des conditions de sécheresse et indique la contribution des températures dans l'analyse des sécheresses.

5. CONCLUSION

Dans cet article, trois indices de sécheresses météorologiques ont été utilisés afin d'évaluer l'intensité, la durée et la fréquence de la sécheresse à l'aide des données annuelles des précipitations sur 6 stations localisées dans les différents domaines climatiques du Sénégal pour la période 1963-2012. L'indice logarithme décimal des déviations pluviométrique (IDP), l'indice des anomalies pluviométriques (IAP) et l'indice standardisé de précipitations (ISP) ont été évalués à différentes échelles de temps de calcul (5 ans, 25 ans et 50 ans) et les résultats ont montré que ces indices permettent de caractériser les épisodes de sécheresses météorologiques au Sénégal.

En outre, les sécheresses les plus remarquables de par leur intensité, leur durée et leur fréquence ont été observées durant la période 1970-1999 et ce quels que soient l'échelle de temps et l'indice considéré. Ces épisodes secs ont atteint leur paroxysme en 1972 et 1983 avec des sécheresses de types extrême et sévère. Des six stations étudiées, celles de Dakar et Matam, dans le domaine sahélien, semblent les plus affectées par la sécheresse. Des trois échelles de temps

considérés, celle à long terme (échelle de temps de calcul de 5 ans) semble la mieux appropriée pour décrire les séquences de sécheresse car, à ce pas de temps, l'indice devient stable, permettant ainsi de définir avec plus de précision les épisodes secs. Des trois indices calculés, l'indice standardisé de sécheresse (ISP) semble le plus connu, le plus largement utilisé à travers le monde dans la caractérisation de la sécheresse météorologique, car il a des avantages en termes de cohérence statistique, et a la capacité de décrire, à la fois, à court et à long termes (échelle de temps de calcul de 5 et 50 ans) les impacts de la sécheresse à travers les différentes échelles de temps.

Enfin, l'ISP, l'IAP et l'IDP pourraient être utilisés pour la gestion opérationnelle de la sécheresse et des ressources en eau, car ils remplissent les quatre critères de base que n'importe quel indice de sécheresse devrait respecter (Rao et Voeller, 1997 ; Heim, 2002) : i) le problème de l'échelle de temps est adressée, ii) les indices sont des mesures quantitatives à grande échelle, des conditions de sécheresses longues et continues, iii) les indices sont applicables au problème étudié et iv) les indices sont calculés sur une base de temps quasi réelle. L'étude a démontré comment surmonter le manque de données pour la caractérisation de la sécheresse et la surveillance dans certains pays en développement où soit les données ne sont pas disponibles, soit leur accès est encore coûteux ou difficile. D'autres investigations sont nécessaires pour établir un système global de suivi pour un avertissement du début de la sécheresse. Cela peut être atteint en intégrant les paramètres de températures et d'humidité du sol, qui peuvent être liés à un modèle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALI A. & T. LEBEL (2009). The Sahelian standardized rainfall index revisited. *Int. J. Climatology.*, 29 (12), 1705-1714.
- AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (AMS) (2004). Statement on meteorological drought., *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 85, 771-773.
- ARDOIN-BARDIN S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en

- zone soudano sahélienne. *Thèse de doct. Univ. Montpellier II*, 440 p.
- BARUA S., B. J. C. PERERA & A. W. M. NG (2009). A comparative drought assessment of Yarra River Catchment in Victoria, Australia. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July, 3245-3251.
 - BAYARJARGAL Y., A. KARNIELI, M. BAYASGALAN, S. KHUDULMUR, C. GANDUSH & C. J. TUCKER (2006). A comparative study of NOAA–AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote. Sens. Environ.*, 105(1), 9-22.
 - BEAUDIN I. (2007). Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen. Rapport de Maîtrise en Sciences Géomatiques, Université Laval, 233 p.
 - BHALME H. N. & D. A. MOOLEY (1980). On the performance of modified Palmer Index Drought conditions, India. Hydrological aspects of droughts: International symposium, 3-7 December 1979, New Delhi: Proceedings. Session 3. Trends and Prediction of Droughts, 373-383.
 - BHUIYAN C. (2004). Various Drought Indices for Monitoring Drought Condition in Aravalli Terrain of India, Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12–23.
 - BODIAN A. (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, vol. VIII, 297-312.
 - BODIAN A. (2011). Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal. *Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar*, 288 p.
 - BYUN H. R. & D. A. WILHITE (1999). Objective quantification of drought severity and duration. *J. Climate*, 12, 2747-2756.
 - CHANG T. J. (1991). Investigation of precipitation droughts by use of kriging method. *J. Irrig. Drain. Engrg.*, ASCE 117 (6), 935–943.
 - CHANG T. J. & X. A. KLEOPA (1991). A proposed method for drought monitoring. *Water Resour. Bull.*, 27, 275–281.
 - DIONE O. (1996). Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie. *Thèse de doctorat, Université Lyon 3 Jean Moulin*, 477 p.
 - ELTAHIR E. A. B. (1992). Drought frequency analysis in Central and Western Sudan. *Hydrological Sci. J.*, 37 (3), 185–199.
 - FAYE C., A. A. SOW & J. B. NDONG (2015). Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement.*, 9, 17-35.
 - FAYE C. (2013). Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé. *Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar*, 309 p.
 - FLEIG A. K., L. M. TALLASSEE, H. HISDAL & D. M. HANNAH (2011). Regional hydrological drought in north-western Europe: linking a new Regional Drought Area Index with weather types. *Hydrol. Process.*, 25 (7), 1163-1179.
 - FRAPPART F., P. HIERNAUX, F. GUICHARD, E. MOUGIN, L. KERGOAT, M. ARJOUNIN, F. LAVENU, M. KOITE, J. E. PATUREL & T. LEBEL. (2009). Rainfall regime across the Sahel band in the Gourma region, Mali. *J. Hydrol.*, 375, 128-142.
 - GIBBS W. J. (1975). Drought, its definition, delineation and effects. In Drought: Lectures Presented at the 26th Session of the WMO. Report No. 5. WMO, Geneva, 3–30.
 - GOULA B. T. A., I. SAVANE, B. KONAN, V. FADIKA & G. B. KOUADIO (2005). Comparative study of climatic variability impact on water resources of N'zo and N'zi watersheds in Côte d'Ivoire – *Sci. & Nat.*, 2 (1), 10-19.
 - HEIM R. R. JR. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 83(8), 1149-1165.
 - IBRAHIM K., W. WAN ZIN & A. JEMAIN (2010). Evaluating the dry conditions in Peninsular Malaysia using bivariate copula. *Anziam. J.*, 51, C555-C569.

- JACOBI J. & D. D. PERRONE (2013). A tool for calculating the Palmer drought indices. *Water Resour. Rev.*, 49 (9), 6086-6089.
- JOUILIL I., K. BITAR, H. SALAMA, I. AMRAOU, A. MOKSSIT & M. Tahiri (2013). Sécheresse météorologique au bassin hydraulique OUM ER RBIA durant les dernières décennies, *Larhyss. J.*, 12, 109-127.
- KHADR M., G. MORGENSCHWEIS & A. SCHLENKHOFF (2009). Analysis of meteorological drought in the Ruhr basin by using the standardized precipitation index. World Academy of Science, *Eng. Technol.*, 57, 607-616.
- LEROUX M. (1983). Le climat de l'Afrique tropicale, *Thèse de doctorat d'Etat, Université, de Dijon*, texte : 3 tomes, 1427 p, 1 atlas météorologique et climatologique, 250 cartes.
- L'HOTE Y., G. MAHE, B. SOME & J. P. TRIBOULET (2002). Analysis of a sahelian rainfall index from 1896 to 2000: the drought continues. *Hydrol. Sci.*, 47(4), 563-572.
- LOPEZ D. N., C. A. M. ROBLES, H. GADSDEN & V. M. REYES-GOMEZ (2006). Caractérisation, à diverses échelles de temps, des séquences de sécheresse dans l'État de Chihuahua (Mexique). *Sécheresse*, 17 (4), 467-474.
- LOUKAS A., L. VASILIADES & N.R. DALEZIOS (2003). Intercomparison of meteorological drought indices for drought assessment and monitoring in Greece, 8th International Conference on Environmental Science and Technology, Lemnos Island, Grecia, 8-10 septembre 2003, 484-491.
- MISHRA A. K. & V. P. SINGH (2010). A review of drought concepts. *J. Hydrol.*, 391, 202-216.
- NALBANTIS I. & G. TSAKIRIS (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resour. Manag.*, 23, 881-897.
- NIANG A. J. (2008). Les processus morphodynamiques, indicateurs de l'état de la désertification dans le Sud-Ouest de la Mauritanie. Approche par analyse multisource. *Thèse de Doctorat, Université de Liège* (Belgique), 286 p.
- OBASSI G. O. (1994). WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 75-9.
- OUOBA A. P. (2013). Changements climatiques, dynamique de la végétation et perception paysanne dans le Sahel burkinabè. *Thèse de Doctorat Unique, Université de Ouagadougou* (Burkina Faso), 305 p.
- OZER P., Y. C. HOUNTONDI & O. LAMINOU MANZO (2009). Évolution des caractéristiques pluviométriques dans l'Est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop, Rev. Géogr. Écol. Trop.*, 33, 11 - 30.
- PALMER W. (1965). Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 58 p.
- PANTHOU G., T. VISCHEL & T. LEBEL (2014). Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *Int. J. Clim.* Disponible sur : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3984/abstract> .
- PASHIARDIS S. & S. MICHAELIDES (2008). Implementation of the standardized precipitation index (SPI) and the reconnaissance drought index (RDI) for regional drought assessment: a case study for Cyprus. *Eur. Water.*, 23/24, 57-65.
- RAO A. R. & T. L. Voeller (1997). Development and testing of drought indicators. *Water Resour. Manag.*, 11(2), 119-136.
- SAGNA P. (2005). Dynamique du climat et de son évolution récente dans la partie ouest de l'Afrique occidentale. *Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar*, 786 p.
- SANTOS M. A. (1983). Regional droughts: a stochastic characterization. *J. Hydrol.*, 66, 183-211.
- SERVAT E., J.E. PATUREL, H. LUBES-NIEL, B. KOUAME, J.M. MASSON, M. TRAVAGLIO ET B. MARIEU (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Rev. sci. de l'eau*, 12 (2), 363-387.
- SHAFER B. A. ET L. E. EDEZMAN (1982). Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: Proceedings of the Western Snow Conference. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 164-175.
- SHARMA T. C. et U. S. Panu (2010). Analytical procedures for weekly hydrological droughts: a

- case of Canadian rivers. *Hydrol. Sci. J.*, 55 (1), 79-92.
- SIGHOMNOU D., (2004). Analyse et redéfinition des régimes climatiques et Hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. *Thèse Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé 1, Département des Sciences de la Terre*, 291 p.
 - SORO G. E., D. G. L. ANOUMAN, BI T. A. GOULA, B. SROHOROU ET I. SAVANE (2014). Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique a diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l'extrême Nord-ouest de la cote d'ivoire. *Larhyss J.*, 18, 107-124.
 - SOW A. A. (2007). L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé, *Thèse de doctorat d'Etat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar*, 1232 p.
 - STANGA I. C. (2009). Quantifier la sécheresse. durée, intensité, fréquence. *Analele Stiintifice ale Universităţii Al I. Cuza" Iaşi, Tom LV s. II – c, Geografie 2009*, 31-46.
 - TIRANDAZ M. & A. ESLAMI (2012). Zoning droughts and wetness trends in north of Iran: A case study of Guilan province. *Afr. J. Agr. Res.*, 7(15), 2320-2327.
 - VAN ROOY M. P. (1965). A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos.*, 14, 43–48.
 - VICENTE-SERRANO S. M., S. BEGUERIA & J. I. LOPEZ-MORENO. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index –SPEI. *J. Clim.*, 23 (7), 1696-1718.
 - WATSON E., P. FORSTER, M. RICHARDS & H. J. BANDELT (1997). Mitochondrial footprints of human expansions in Africa. *Am. J. Hum. Genet.*, 61(3), 691–704.
 - WILHITE D. A. (2000). Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. *Drought: A Global Assessment* Routledge, London, UK.
 - WILHITE, D. A. & M. H. GLANTZ (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water. Int.*, 10, 111–120.
 - WOLI P. J. W. JONES, K. T. INGRAM & C. W. FRAISSE (2012). Agricultural reference index for drought. *Agronom. J.*, 104 (2), 287-300.