

## Évaluation de la sécheresse dans la région ouest de Madagascar

Jean HARY<sup>1\*</sup>, A. RATIARISON<sup>1</sup>, J. M. M. ANDRIAMAMPINANINA<sup>1</sup>,  
J. M. RABEHARISOA<sup>1</sup>, et J. RAKOTOVELO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de la Dynamique de l'Atmosphère, du Climat et des Océans (Dy ACO), Faculté des Sciences,  
Université d'Antananarivo, Madagascar

<sup>2</sup>Institut Supérieure des Sciences et Technologie de Mahajanga, Université de Mahajanga, Madagascar

\* Correspondance, courriel : [jjeanhary@yahoo.com](mailto:jjeanhary@yahoo.com)

### Résumé

Ce travail entre dans le cadre de recherche de changement climatique dans la région centre ouest de Madagascar. C'est un outil qui fournit des informations très intéressantes pour les chercheurs à venir. Il a pour but d'évaluer la situation de sécheresse météorologique dans la région concernée. Cette zone s'étend de 42°E à 46°E en longitude et 16°S à 21°S en latitude. Nous avons traité les données des précipitations de 1979 à 2012, provenant de l'ECMWF (Européen Center for Medium Range Weather Forecast) avec un pas de résolution de 0,5° x 0,5°. En ce qui concerne le traitement numérique et la programmation, les logiciels MATLAB et EXCEL sont utilisés. L'indice standardisé des précipitations est analysé pour évaluer la situation de sécheresse dans cette zone. Trois catégories de sécheresses sont trouvées : la sécheresse proche de la normale, la sécheresse modérée et la sécheresse extrême dont les pourcentages en temps sont respectivement 35,294 %, 11,764 % et 2,941 %. L'analyse de temps d'attente aboutit aux résultats suivants : les jours de non pluie oscillent entre 237 et 298 d'une part, et d'autre part les jours de pluie varient de 67 à 137. Le nombre de jours de non pluie atteint sa valeur maximale 298 en 2006. La sécheresse dans la région centre Ouest suit deux lois : la loi de Beta et la loi généralisée de Pareto. À partir de ces résultats obtenus, on pourra faire une étude de prévisibilité de la sécheresse dans cette zone.

**Mots-clés :** pluie, sécheresse, indice standardisé des précipitations (ISP), lois de probabilités.

### Abstract

#### Evaluation of drought in the region western of Madagascar

This work falls under the framework of research of climate change in the western region of Madagascar. It is the tool that provides very interesting information for future researchers. Its purpose is to assess the meteorological situation in the region concerned. This area extends from 42 ° E to 46 ° E in longitude and 16 ° S to 21 ° S in latitude. The rainfall data of 1979 to 2012 are used, and it is from the ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecast) were processed with a resolution step of 0.5° x 0.5°. For digital processing and programming, MATLAB and EXCEL are used. The standardized precipitation index is analyzed to assess the situation of drought in the area. Three categories of drought are found : drought near normal, the moderate drought and severe drought which the time percentages are respectively 35.294 %, 11.764 %, and 2.941 %. The waiting time analysis yielded the following results : day of rain not oscillate

between 237 and 298 on the one hand, and the rain days ranged from 67 to 137 on the other hand. The number of days of rain not reached its maximum value 298 in 2006. The drought in the region West center follows two laws : the law of Beta and the generalized Pareto. From these results, a predictability study of the drought in this area can be carried out.

**Keywords :** *rain, drought, standardized precipitation index (SPI), the laws of probability.*

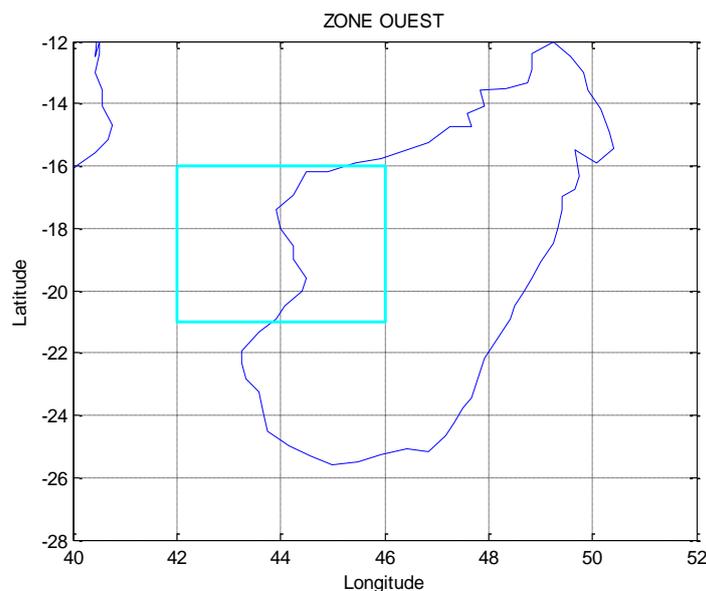
## 1. Introduction

Plusieurs pays, notamment ceux d'Afrique sont touchés par la sécheresse météorologique, et Madagascar en fait partie. D'une manière très fréquente l'insuffisance des précipitations est la cause de ce phénomène [1]. Nous aimerons par le présent travail comment se manifeste le phénomène de sécheresse dans la région Ouest de Madagascar et que préconisons nous afin de contribuer aux prévisions en ce qui lui concerne. De ce fait, nous choisissons les données des précipitations de 1979 à 2012 comme outil de base pour la réalisation de ce travail. Avec ces données, nous avons pu faire une étude statistique. L'objectif visé par ce travail est l'évaluation de la sécheresse dans cette zone. En fait, les intérêts de ce travail sont les suivants : d'abord, qu'il permette de prévoir le nombre de jour de non pluie ou de la sécheresse pour les années à venir ; qu'il permet de connaître que la sécheresse dans cette zone suit les lois beta et de la loi généralisé de Pareto, puis qu'il y a apparition d'une tendance à la hausse de jour de non pluie.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Localisation de la zone d'étude

Notre étude est localisée sur la côte Ouest de Madagascar. Cette zone s'étend de 42°E à 46°E en longitude et 16°S à 21°S en latitude, comme indiqué par le rectangle de coloration vert claire que nous présentons sur la **Figure 1**.



**Figure 1 :** *Situation géographique de notre étude*

*Elle est constituée par trois régions (Melaka, Menabe, Boeny) et inclus une partie du canal de Mozambique.*

## 2-2. Matériel

Nous avons utilisé les données des précipitations provenant de l'Européen Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) avec un pas de résolution de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ . Ces données ont une période de 34 ans (du 1979 à 2012). En ce qui concerne le traitement numérique et la programmation, les logiciels MATLAB et EXCEL sont utilisés.

## 2-3. Méthode

### 2-3-1. Indice standardisé de précipitation

Dans notre étude, nous choisissons l'indice des précipitations standardisé (SPI) parce qu'elle a été adopté par l'organisation météorologique mondiale (O.M.M.) en 2009 et utilisé comme instrument mondial pour mesurer les sécheresses météorologiques. En juin 2011, cet indice a été soumis à l'approbation pendant la seizième session du congrès météorologique mondial [2, 3]. D'après Gutmann [4], l'utilisation de cet indice nécessite au moins une série de donnée des précipitations de 20 à 30 ans. Les indices sont négatifs pour les sècheresses et positifs pour les saisons humides. Voici la relation donnant l'indice SPI selon Mossad Khadr :

$$SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \text{ pour } x < H(x) < 0.5 \quad (1)$$

$$SPI = -\frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \text{ pour } 0.5 < H(x) < 1 \quad (2)$$

où,

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(H(x))^2} \right]} \text{ pour } 0 < H(x) < 0.5 \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(1-H(x))^2} \right]} \text{ pour } 0.5 < H(x) < 1 \quad (4)$$

$$c_0 = 2,515517; c_1 = 0,802853; c_2 = 0,010328; d_0 = 1,432788; d_1 = 0,189269; d_2 = 0,001308$$

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (5)$$

où,

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (6)$$

$H(x)$  : C'est la probabilité cumulée quand  $x = 0$ ;  $q$ : fréquence des jours de non pluie ;  $x$  : est la précipitation historique sur la période considérée.

Dans la pratique nous prenons donc la formule donnant l'indice des précipitations standardisé suivante :

$$SPI(i) = \frac{(P_i - P_m)}{\sigma} \quad (7)$$

où,  $P_i, P_m, \sigma$  sont respectivement la précipitation de l'année  $i$ , précipitation moyenne annuelle et l'écart type des précipitations moyennes annuelles. L'état de sécheresse ou d'humidité dépend des valeurs de SPI.

Le **Tableau 1** ci-dessous donne la correspondance entre SPI et les états :

**Tableau 1 : État de sécheresse et l'humidité source [5 - 7]**

Indice de précipitation standardisé (SPI)	Catégorie de sécheresse
$SPI \leq -2,0$	sécheresse extrême
$] -2,0 \quad -1,5 ]$	Sécheresse fort
$] -1,5 \quad -1,0 ]$	Sécheresse modérée
$] -1,0 \quad 0 ]$	Proche de la normale
$[ 0 \quad 1,5 [$	Humidité modérée
$[ 1,5 \quad 2,0 [$	Humidité forte
$SPI \geq 2$	Humidité extrême

### 2-3-2. Quelques lois de probabilités

- Loi Gamma

On appelle loi gamma de paramètres  $a$  et  $\lambda$  la loi de probabilité absolument continue dont sa densité est donnée par :

$$p(x) = 11_{]0, \infty[}(x) \frac{\lambda^a}{\Gamma(a)} x^{a-1} e^{-\lambda x}, x \in R_+, \lambda \in R_+^* \text{ et } a \in R_+^* \quad (8)$$

$\Gamma(a)$  est le facteur de normalisation. D'après Euler :

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty t^{a-1} e^{-t} dt \quad (9)$$

On rappelle que si  $n \in N^*$ ,

$$\Gamma(n) = (n-1)!, \Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi} \cdot 1 \times 2 \times 3 \times 5 \dots (2n-1) / 2^n \quad (10)$$

Si  $x$  la variable aléatoire de la loi  $\Gamma(k, \lambda)$  alors :

$$E(x) = \frac{k}{\lambda}; \text{Var}(x) = \frac{k}{\lambda^2}; \varphi_x(\Theta) = \left(\frac{\lambda}{\lambda-1}\right)^k \quad (11)$$

Parfois les lois Gamma sont nommées lois d'Erlang.

- Loi Beta

On appelle loi Beta de paramètres  $a$  et  $b$  la loi de probabilité absolument continue dont une densité est donnée par :

$$p(x) = 11_{]0, \infty[}(x) \frac{x^{a-1}(1-x)^{b-1}}{B(a,b)}; x \in R, a \text{ et } b \in R_+^* \quad (12)$$

$B(a, b)$  est le facteur de normalisation.

$$B(a, b) = \frac{\Gamma(a)\Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} \quad (13)$$

- Loi Student

La loi de Student à  $\nu$  degré de liberté est la loi de probabilité absolument continue dont la densité est donnée par :

$$P(x) = \frac{1}{\pi} \frac{\Gamma(\frac{\nu+1}{2})}{\Gamma(\frac{\nu}{2})} \left(1 + \frac{x^2}{\nu}\right)^{-(\nu+1)/2} \text{ ou } x \in R \tag{14}$$

- Loi de Pareto Généralisée [8 - 10]

La fonction de densité de probabilité de la loi Pareto généralisée est exprimée par (Pickands, 1975 ; Embrechts et als, 1997) :

$$P(x) = 1 - \left(1 - k \frac{(x-\xi)}{\alpha}\right)^{1/k} \tag{15}$$

où,  $\xi$  est le paramètre de position,  $\alpha$  le paramètre d'échelle et  $k$  le paramètre de forme Loi log normal.

La fonction de densité de probabilité de la loi log normal est exprimée par :

$$P(Q) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_1^Q \frac{1}{q} \exp\left(-\frac{(\ln q - m)^2}{2\sigma^2}\right) dq \tag{16}$$

où,  $m$  est le paramètre de position et  $\sigma$  le paramètre d'échelle

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. L'isohyète dans la zone ouest

Pour une période donnée, l'isohyète [11] se dit d'une ligne passant par les points de la terre où le volume des précipitations est le même.

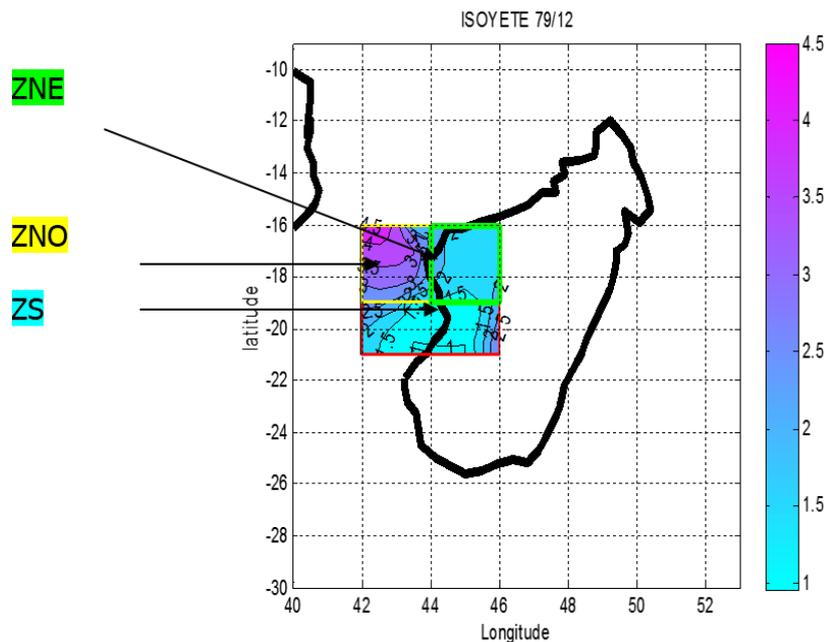
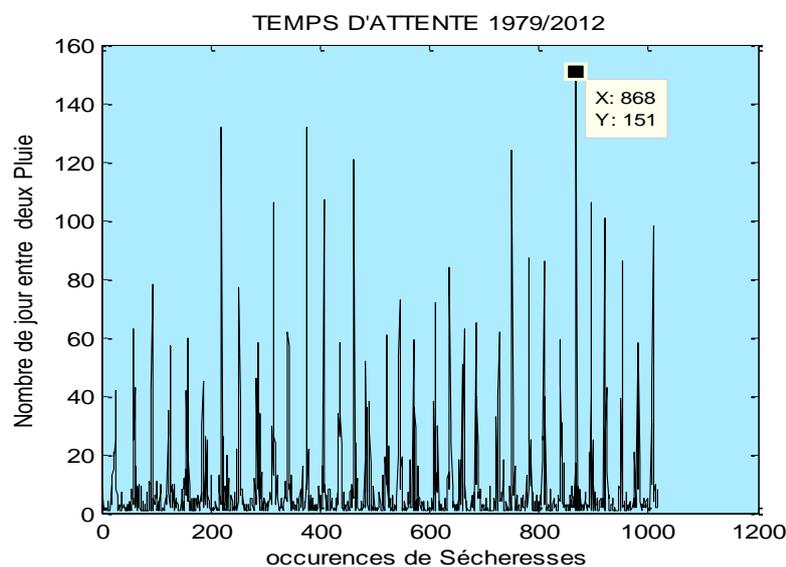


Figure 2 : Distribution de pluie moyenne journalière dans la région ouest de Madagascar

La **Figure 2** illustre la présence de trois zones presque de même condition climatique. La première zone notée par ZS (zone sud) entouré en rouge et délimitée par les latitudes  $19^{\circ}\text{S}$  à  $21^{\circ}\text{S}$  et les longitudes  $42^{\circ}\text{E}$  à  $46^{\circ}\text{E}$  est caractérisée par des précipitations de hauteur plus faible. La deuxième noté ZNE (Zone Nord Est) délimitée par les latitudes et les longitudes respectivement :  $16^{\circ}\text{S}$  à  $19^{\circ}\text{S}$  et  $44^{\circ}\text{E}$  à  $46^{\circ}\text{E}$ . La dernière notée ZNO (zone Nord-Ouest entourée en jaune) incluse une partie du Canal de Mozambique qui avait des hauteurs des précipitations plus élevées que les deux autres précédentes. Comme la sécheresse a un caractère régional [8] et varie d'une région à l'autre, sans doute on peut dire que les trois régions ont des catégories de sécheresse différentes.

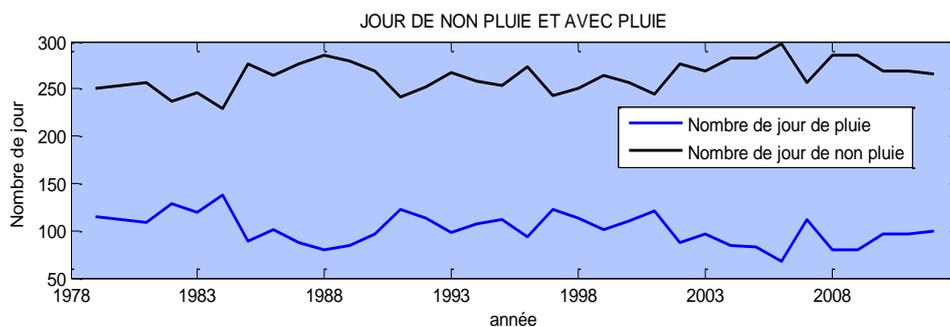
### 3-2. Résultats sur le temps d'attente

On définit le temps d'attente [12] comme la durée qui sépare deux évènements de pluies consécutives. Nous traçons ci-dessous la courbe de temps d'attente correspondant à la région de notre travail.



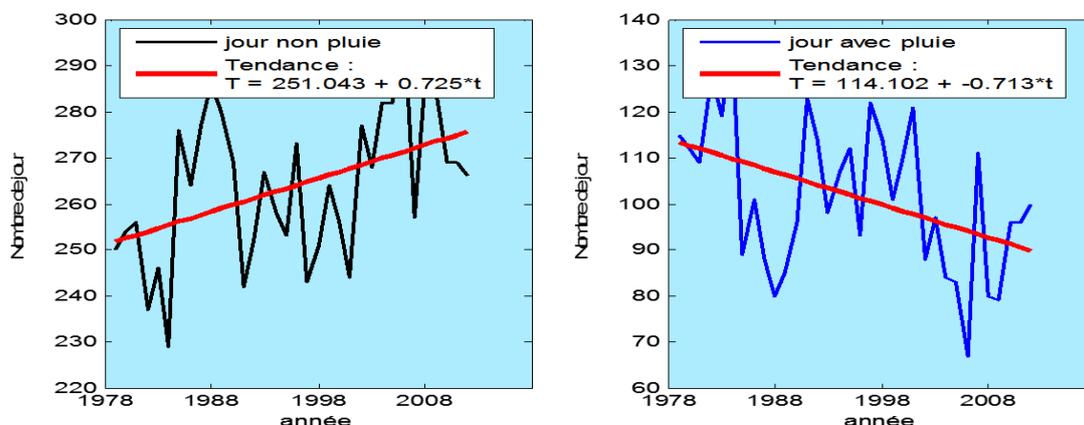
**Figure 3 :** Temps d'attente entre deux pluies dans la région ouest de Madagascar de 1979 à 2012

La courbe ci-dessus est obtenue avec la condition suivante : (précipitation inférieure à 1.5 mm est considérée comme sécheresse). Le temps d'attente maximal atteint 151 jours (environ 5 mois). A partir de cette courbe, on peut déduire le nombre de jour annuel non pluvieux et avec pluie. Nous présentons ci-dessous simultanément les variations de jour non pluvieux et avec pluie.



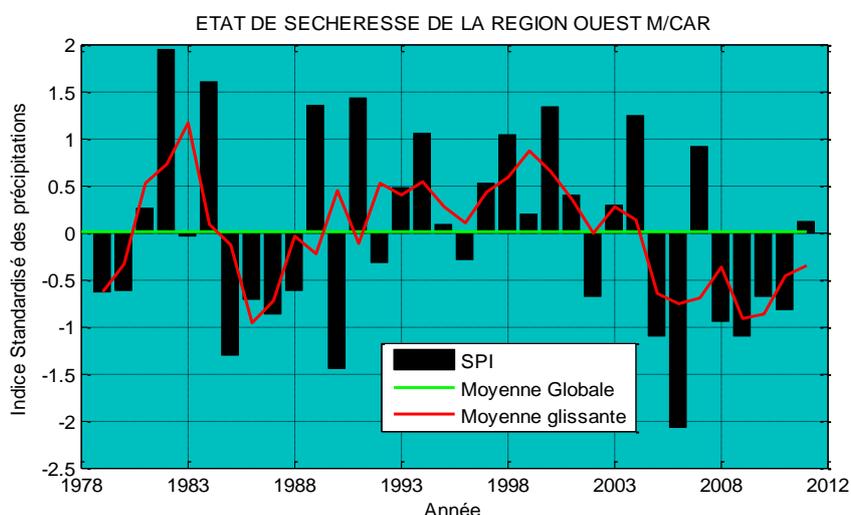
**Figure 4 :** Évolution des nombres de jours de non pluie et avec pluie durant 34 ans.

La **Figure 4** ci-dessus nous montre que les jours de non pluies sont prépondérants que ceux avec pluie. Les jours de non pluie oscillent de 237 à 298, tandis que les jours de pluie varient de 67 à 137 (environs deux à quatre mois). En 2006, le nombre de jour de non pluie atteint la valeur maximale (298).



**Figure 5 :** Évolution de nombre de jour de non pluie et du nombre de jour avec pluie puis de leurs tendances

Il y a apparition d'une tendance à la hausse de nombre de jour de non pluie. Cette tendance a pour équation de droite de pente positive égale à 0,725. Mais elle décroît pour les jours avec pluie. Pour mieux comprendre la situation de la sécheresse dans la région Ouest de Madagascar, nous présentons ci-dessous les **Figures (Figure 6)** donnant les indices des précipitations standardisés de chaque région.

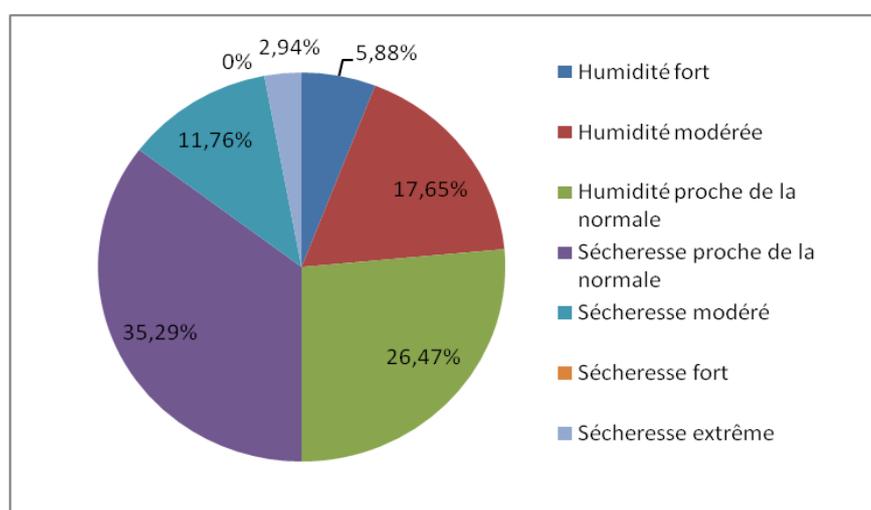


**Figure 6 :** Indice standardisé des précipitations (SPI) de 1979 à 2012 dans la région ouest de Madagascar

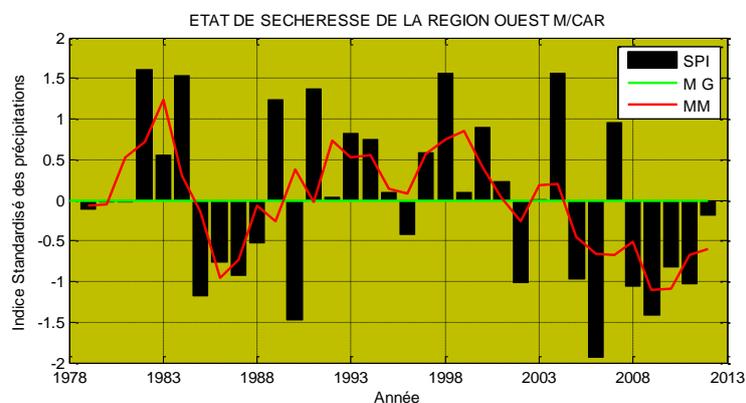
Sur la **Figure 6**, on constate que la courbe en rouge (moyenne mobile) passe au-dessus de la moyenne globale pour les périodes humide et elle se trouve en dessous de la moyenne globale pour les périodes de sécheresse. Les années 1985 et 1990 2005, 2009 sont touchées par la sécheresse modérée. Il y avait apparition de la sécheresse extrême durant l'année 2006, dont l'intensité atteint la valeur de -2,07. Les années 1979, 1980, 1983, 1986, 1987, 1988, 1992, 1996, 2002, 2008, 2010, 2011 sont caractérisées par la sécheresse proche de la normale. La région ouest de Madagascar a subi de la sécheresse pendant 17 années sur 34. Nous présentons sous forme d'un **Tableau** l'état de sécheresse dans cette zone. Nous présentons dans le **Tableau** ci-dessous (**Tableau 2**) l'ampleur de la sécheresse correspondant à chaque catégorie.

**Tableau 2 : Probabilité d'apparition de la sécheresse à l'échelle du temps**

Classes	Nombre d'années	Pourcentage de temps(en année)
Humidité extrême	0	0 %
Humidité fort	2	5,882 %
Humidité modérée	6	17,647 %
Humidité proche de la normale	9	26,470 %
Sécheresse proche de la normale	12	35,294 %
Sécheresse modéré	4	11,764 %
Sécheresse fort	0	0 %
Sécheresse extrême	1	2,941 %
TOTALE	34	99,998 %

**Figure 7 : Ampleur de la sécheresse de la région Ouest de Madagascar de 1979 à 2012**

Dans la **Figure 7**, les chiffres marqués représentent les pourcentages des années d'étude. La région Ouest de notre étude est dominée par des saisons à sécheresse proche de la normale, soit 35,294 % de la période totale ; suivi de l'humidité proche de la normale (26,47 %). Nous présentons ci-après les résultats obtenus pour chaque zone

**Figure 8 : Indice standardisé de précipitation de la zone ZS**

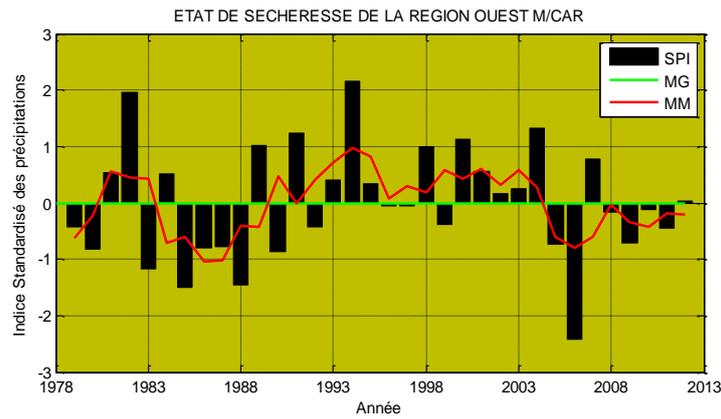


Figure 9 : Indice standardisé de précipitation de la zone ZNE

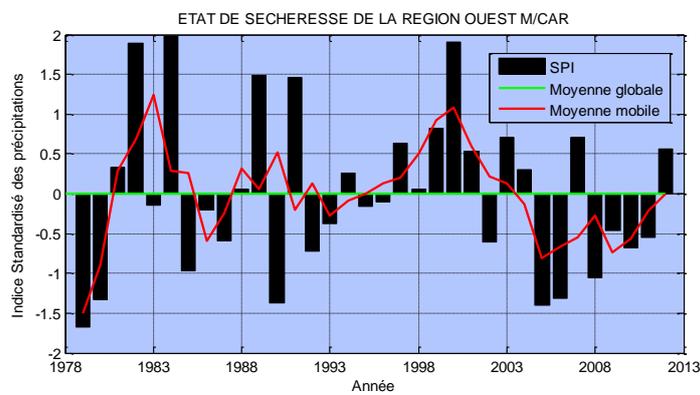


Figure 10 : Indice standardisé de précipitation de la zone ZNO

Les **Figures 8, 9 et 10** représentent l'indice standardisé de précipitation pour les trois zones. Nous nous intéressons à l'étude de SPI de valeur négative.

Tableau 3 : Situation de la sécheresse dans la zone ZS

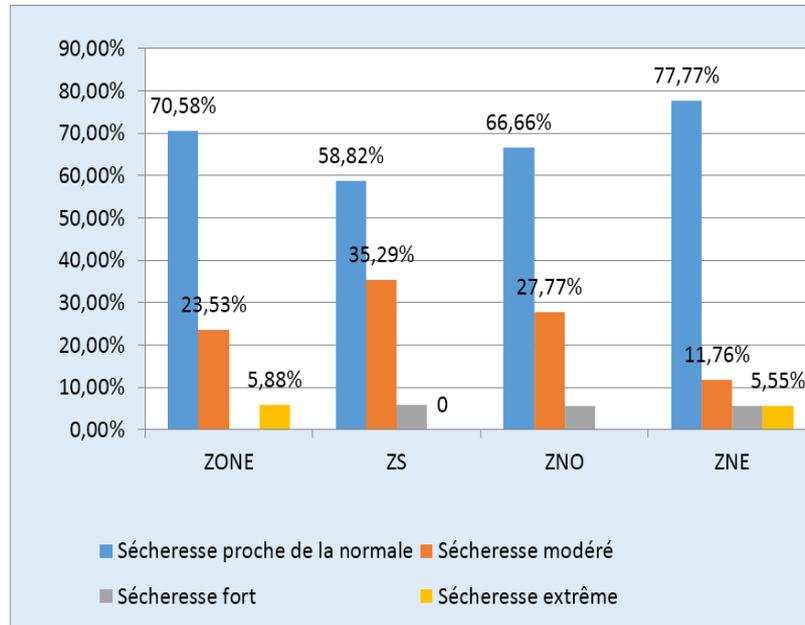
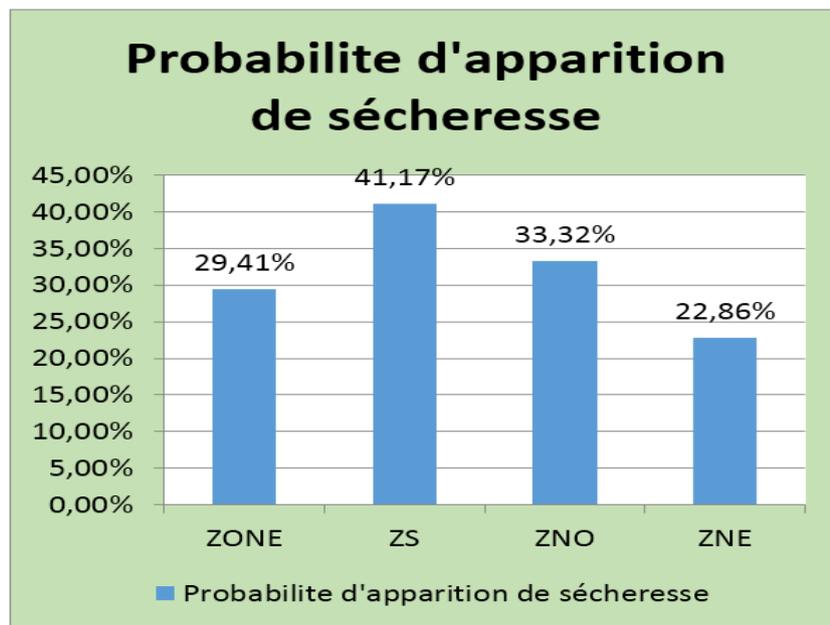
Etats de la sécheresse	Nombre d'années	Probabilité d'apparition
Sécheresse proche de la normale	10	58,82 %
Sécheresse modérée	6	35,29 %
Sécheresse fort	1	5,88 %
Sécheresse extrême	0	0

Tableau 4 : Situation de la sécheresse dans la zone ZNE

Etats de la sécheresse	Nombre d'années	Probabilité d'apparition
Sécheresse proche de la normale	14	77,77 %
Sécheresse modérée	2	11,76 %
Sécheresse fort	1	5,55 %
Sécheresse extrême	1	5,55 %

**Tableau 5 : Situation de la sécheresse dans la zone ZNO**

Etats de la sécheresse	Nombre d'années	Probabilité d'apparition
Sécheresse proche de la normale	12	66,66 %
Sécheresse modérée	5	27,77 %
Sécheresse fort	1	5,55 %

**Figure 11 : Situation de la sécheresse dans chaque zone****Figure 12 : Comparaison de la probabilité d'apparition de la sécheresse pour chaque zone**

La zone sud est la plus touchée par la sécheresse.

Ajustement de la loi avec la sécheresse pour la zone

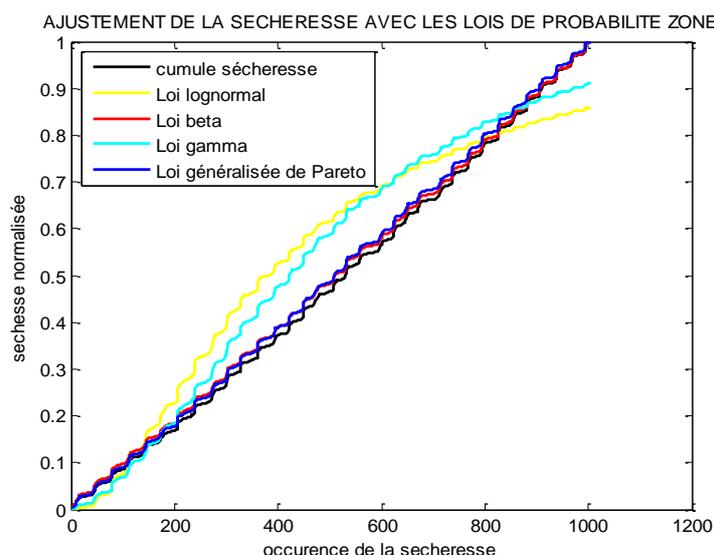


Figure 13 : Ajustement des lois de probabilités avec cumul de sécheresse normalise dans la zone

Les lois log normal et gamma présentent un énorme écartement avec le cumul de sécheresse normalisé, alors que les lois Beta et généralisé de Pareto sont presque accolées avec le cumul de la sécheresse normalisé. Donc la sécheresse de la zone de notre étude suit les lois Beta et généralisée de Pareto. Ainsi nous allons voir aussi les lois suivies par la sécheresse pour la zone sud et de la zone nord Est.

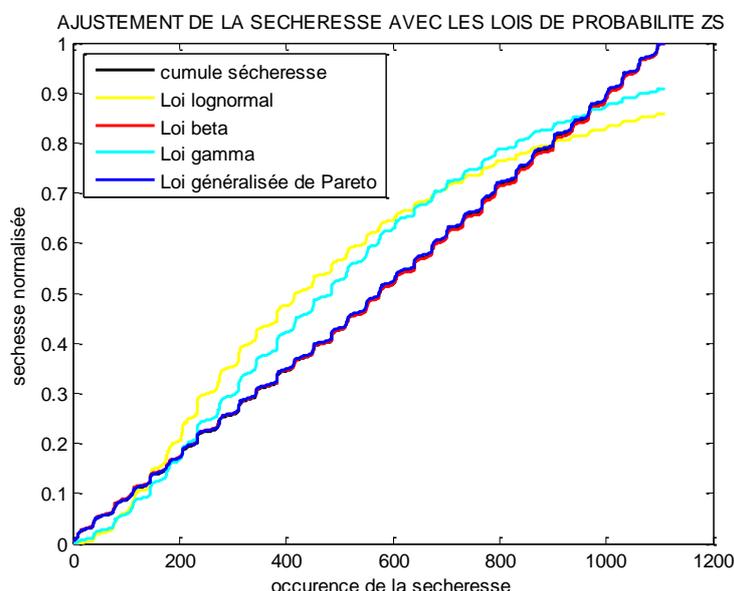
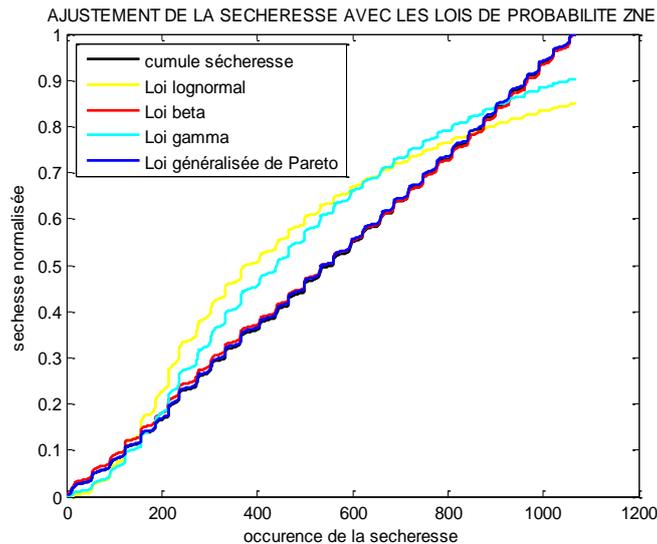


Figure 14 : Ajustement des lois de probabilités avec le cumul de sécheresse normalise dans la zone sud

Les lois log normal et gamma présentent un énorme écartement avec le cumul de sécheresse normalisé, alors que les lois Beta et généralisé de Pareto sont presque accolées avec le cumul de sécheresse normalisé. Donc la sécheresse dans la zone sud suit les lois de Beta et les lois généralisées de Pareto.



**Figure 15 :** Ajustement des lois de probabilités avec cumul de sécheresse normalisée dans la zone nord Est

Les lois log normal et gamma présentent un énorme écartement avec le cumul de sécheresse normalisé, alors que les lois Beta et généralisé de Pareto sont presque accolées avec le cumul de la sécheresse normalisé. Donc la sécheresse dans la zone nord Est suit les lois de Beta et généralisés de Pareto.

#### 4. Conclusion

La courbe représentative de l'isohyète dans la région de notre étude présente trois catégories de situation des précipitations. La partie sud de cette zone reçoit des précipitations plus faibles. Les jours de non pluie oscillent de 237 à 298 par année. En 2006, le nombre de jour de non pluie atteint la valeur maximale 298. Il y a apparition d'une tendance à la hausse du nombre de jour de non pluie. Cette tendance est une droite de pente positive égale à 0,725. Les catégories de sécheresses observées au cours de l'étude de SPI sont : la sécheresse proche de la normale, la sécheresse modérée et la sécheresse extrême ; dont les pourcentages en temps sont respectivement 35,294 %, 11,764 %, 2,941 %. L'étude de l'ajustement à des lois de probabilités du cumul de la sécheresse permet de conclure que la sécheresse dans la région centre Ouest suit deux lois : la loi de Beta et la loi généralisée de Pareto.

#### Référence

- [1] - A. BEDOUM, « Impacte de la variabilité pluviométrie et de la sécheresse au sud du Tchad, effet changement climatique », *Rev IVOIR. Sci-Technol.*, 23 (2014) 13 - 30, 13 ISSN 1813-3290N
- [2] - M. BIAD-CHARRETON, « Sécheresse, Désertification et Développement en Afrique », Cours Master2-2007 -UVSQ et CERDI version, (2009)
- [3] - M. SVOBODA, M. HAYES et D. WOOD, « Guide d'utilisation de l'indice de précipitation normalisée » (COM M.N° 1090). Genève, (2012)
- [4] - M. SVOBODA, M. HAYES et D. WOOD, « WMO standardized precipitation index user guide fr (2012) pdf »
- [5] - J. E. RANDRIANANTENAINA, « Analyse et modélisation de la sécheresse météorologique au sud de Madagascar » *Thèse de l'Université de Toliara. Faculté des Sciences*, (2015)

- [6] - R. RODOLPHE, « Inter - corrélation entre la pluviométrie et le débit sauvage en amont de la centrale hydraulique du site Andekaleka » *Thèse de l'Université d'Antananarivo*. Faculté des Sciences, (2015)
- [7] - M. LAYELMAM, « Calcul des indicateurs de sécheresse à partir des images NOAA/AVHRR », (2008)
- [8] - I. JOUILIL, K. BITAKAR, H. SALAMA, AMAROU, A. MOKSSIT, M. TAHIRI, « Sècheresse météorologique Bassin hydraulique oumerrbia durant les dernières décennies », *Lahyss journal*, ISSN 1112-3680, 12 (2013) 109 - 127
- [9] - M. DONALD WILHITE, « Suivi de la sécheresse et alerte précoce : principes, progrès et enjeux futurs » OMM, N° 1006 (2006), ISBN 92-63-21006-3
- [10] - A. YIAOUI, A. AISSAOUI, « Analyse statistique des étiages. Cas du bassin versant de l'Oued Mekerra W. Sidi-Bel-Abbes ». *Le journal de l'eau et de l'environnement*, (2014) 99 - 108
- [11] - C. OBLED, C. COSANDEY, M. OBINSON, «Hydrologie continentale », *Physio-Géo*, Volume 7 (2012) 7-13
- [12] - J. GOLDER, «Modélisation d'un phénomène pluvieux local et analyse de son transfert vers la nappe phréatique » Université d'Avignon, (2013)