

## Carecterisation des Secheresses de la Region d'Atsimo Andrefana de Madagascar via Standard Precitipation Index (SPI)

**Rija Santaniaina Rakotoarimanana, Doctorant**

Université d'Antsiranana, Madagascar

**Tiana Razefania Ramahefy, Docteur Ingénieur**

Université d'Antananarivo, Madagascar

**Solofo Randrianja, Professeur titulaire**

Université d'Antsiranana, Madagascar

[Doi:10.19044/esj.2024.v20n9p34](https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n9p34)

Submitted: 26 December 2023

Accepted: 12 March 2024

Published: 31 March 2024

Copyright 2024 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

*Cite As:*

Rakotoarimanana R.S., Ramahefy T.R. & Randrianja S. (2024). *Carecterisation des Secheresses de la Region d'Atsimo Andrefana de Madagascar via Standard Precitipation Index (SPI)*. European Scientific Journal, ESJ, 20 (9), 34.

<https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n9p34>

### Résumé

Dans cet article, l'étude vise à caractériser les sécheresses de la Région d'Atsimo Andrefana de Madagascar par l'utilisation du Standard Precipitation Index (SPI). Cette région est choisie car elle est confrontée à une sécheresse dévastatrice qui est parmi les sources de la famine touchant cette région. Cette étude pourrait être une étape importante menant vers la prédiction ou prévision de sécheresse dans cette région. Elle pourrait aider les acteurs concernés à adopter des stratégies appropriées pour y faire face. Le SPI est un outil simple à utiliser pour la caractérisation de sécheresse. Seules les données de précipitation sont nécessaires pour le calcul. En effet, les SPI à différents pas de temps sont calculés afin d'avoir les variations, les catégories, l'occurrence et la fréquence de la sécheresse météorologique dans cette région. Ces résultats sont analysés et interprétés pour en tirer la caractérisation. Les données utilisées sont des données pluviométriques dans les relevés mensuels de précipitation, du mois de janvier 1990 jusqu'au mois de mai 2022 de la Région d'Atsimo Andrefana de Madagascar. Les résultats pour une période d'accumulation de précipitation plus courte montrent qu'il se produit au moins 13 épisodes de sécheresse légère tous les 10 ans, 13 épisodes de

sécheresse modérée tous les 33 ans, 9 épisodes de sécheresses sévères tous les 20 ans et 5 épisodes de sécheresse extrême tous les 33 ans. Les résultats relatifs aux périodes d'accumulation moyenne montrent qu'il présente 9 à 26 épisodes de sécheresse légère tous les 20 ans, 8 à 13 épisodes de sécheresse modérée tous les 33 ans, et 9 à 15 épisodes de sécheresse sévère tous les 33 ans, 4 à 5 épisodes de sécheresse extrême tous les 33 ans. Pour les périodes d'accumulation plus longues, les résultats exposent qu'il se manifeste 6 à 11 épisodes de sécheresse légère et 6 épisodes de sécheresse modérée tous les 25 ans, 2 à 5 épisodes de sécheresse sévère et 2 à 4 épisodes de sécheresse extrême tous les 33 ans. La probabilité d'occurrence des catégories climatiques dans cette étude dépasse largement celle de McKee et al en 1993.

---

**Mots-clés:** Prédiction, Caractérisation de la sécheresse, Indice de sécheresse, SPI

---

## **Characterization of Droughts in the Atsimo Andrefana Region of Madagascar via Standard Precipitation Index (SPI)**

*Rija Santaniaina Rakotoarimanana, Doctorant*  
Université d'Antsiranana, Madagascar  
*Tiana Razefania Ramahefy, Docteur Ingénieur*  
Université d'Antananarivo, Madagascar  
*Solofo Randrianja, Professeur titulaire*  
Université d'Antsiranana, Madagascar

---

### **Abstract**

In this article, the study aims to characterize the droughts of the Atsimo Andrefana Region of Madagascar, using the Standard Precipitation Index (SPI). This region is chosen because it is facing a devastating drought which is among the sources of the famine affecting this region. This study could be an important step leading toward the prediction or forecast of drought in this region. It could help the actors concerned to adopt appropriate strategies to deal with them. The SPI is a simple-to-use tool for drought characterization. Only precipitation data is needed for the calculation. Indeed, the SPIs at different time steps are calculated in order to have the variations, categories, occurrence, and frequency of meteorological drought in this region. These results are analyzed and interpreted to characterize them. The data used are rainfall data in the monthly precipitation records, from January 1990 to May 2022 for the Atsimo Andrefana Region of Madagascar. The results for a

shorter precipitation accumulation period show that at least 13 mild drought episodes occur every 10 years, 13 moderate drought episodes every 33 years, 9 severe drought episodes every 20 years, and 5 episodes of extreme drought every 33 years. The results for average accumulation periods show that it has 9 to 26 mild drought episodes every 20 years, 8 to 13 moderate drought episodes every 33 years, and 9 to 15 severe drought episodes every 33 years, 4 to 5 episodes of extreme drought every 33 years. For longer accumulation periods, the results show that there are 6 to 11 episodes of mild drought and 6 episodes of moderate drought every 25 years, 2 to 5 episodes of severe drought, and 2 to 4 episodes of extreme drought every 33 years. The probability of occurrence of climatic categories in this study greatly exceeds that of McKee et al in 1993.

---

**Keywords:** Prediction, Drought Characterization, Drought Index, SPI

## **Introduction**

Le développement durable dans les pays du monde est grandement menacé par la sécheresse. Selon le quatrième rapport du GIEC en 2007, une diminution des ressources en eau disponible et une accentuation de la sécheresse aux latitudes moyennes et dans les zones semi-arides de basses latitudes sont prévues (Sandratirina Andriambolatiana et al., 2013). Au cours des 50 années futures, la prévision indique une augmentation de sécheresse sévère (Bovolo et al., 2010). Des calculs statistiques estiment que de graves pénuries d'eau surviendront dans 35 pays d'ici l'an 2020 (Safari Shad et al., 2013). Depuis l'an 2000, une augmentation de 29% du nombre et de la durée de sécheresse est constatée, en comparant avec les deux précédentes périodes de dix ans (OMM, 2021).

Madagascar est parmi les pays les plus touché par la crise climatique mondiale. Il subit une des pires épisodes de sécheresse de son histoire (Amnesty International, 2021). Malgré l'abondance des ressources en eau, elles sont inégalement distribuées sur le territoire, sont menacées par la réduction des précipitations et l'augmentation des températures (Jean-Etienne Bidou et al., 2007). Selon le rapport de l'Amnesty International, rendu public le 27 octobre 2021, le Sud de Madagascar est confronté à une sécheresse dévastatrice qui a provoqué la famine pour environ un million de personnes. Tous ces événements climatiques extrêmes qui s'intensifient progressivement emmènent le pays à se munir de stratégies d'adaptation pour la protection de la biodiversité et de la préservation des écosystèmes fragiles (Jean-Etienne Bidou et al., 2007).

Face à cette situation, la caractérisation de la sécheresse est indispensable pour mieux l'identifier et anticiper en conséquence. Cela permettra d'aider le pays dans l'élaboration, la réalisation ou l'amélioration de

certaines stratégies. L'objectif est de protéger la biodiversité, préserver les écosystèmes fragiles et contribuer à la réalisation des certains objectifs dans les Objectifs de Développement Durable (ODD), comme l'ODD1, 2, 3, 6, 13 et 14 (Paola Bettelli, 2021).

Concernant la méthode de caractérisation de la sécheresse, plus de 150 indicateurs de sécheresse ont été mis au point, sont en cours d'utilisation et ont été testés pour différentes conditions climatiques, hydrologiques et géographiques (Zargar et al., 2011).

Dans cet article, l'étude se porte sur la « CARACTERISATION DES SECHERESSES DE LA REGION D'ATSIMO ANDREFANA DE MADAGASCAR VIA STANDARD PRECIPITATION INDEX (SPI) ». Le SPI est, dans ce cas, calculé dans différents pas de temps, notamment 3, 6, 9, 12 et 48 mois. L'objectif est d'avoir les variations, les catégories, l'occurrence et la fréquence de la sécheresse météorologique dans cette région. Ces résultats sont analysés et interprétés pour en sortir des conclusions

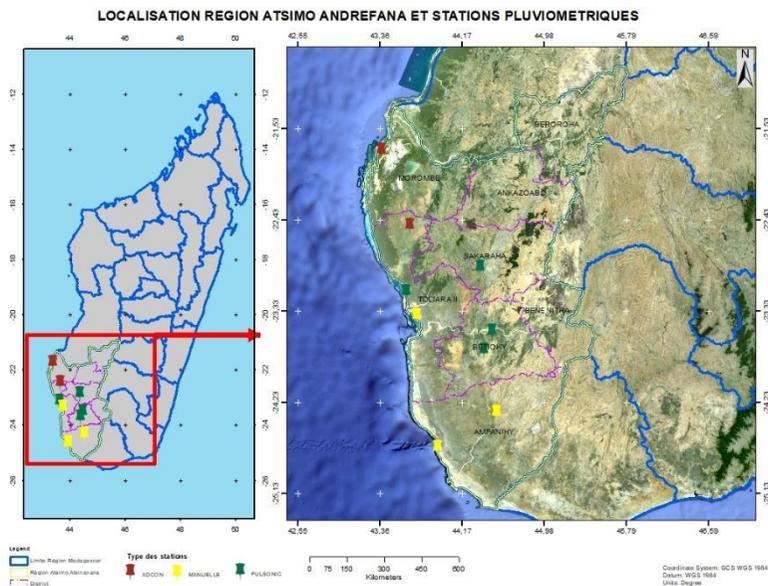
## **Présentation de la zone d'étude**

### ***Contexte général***

La région d'Atsimo Andrefana de Madagascar est choisie dans cette étude comme zone d'étude, car elle est la plus vulnérable en terme d'effets du changement climatique et de la sécheresse par rapport aux autres régions de Madagascar. Cette région se trouve dans la partie « midi occidentale » de Madagascar. Cette région se trouve dans la partie « midi occidentale » de Madagascar, sa délimitation est marquée par le fleuve Mangoky (Nord), par le massif ruiniforme de l'Isalo et une partie de la région d'Ihorombe (Est), par le fleuve Menarandra (Sud) et par le Canal de Mozambique (Ouest). La Superficie occupée par la Région d'Atsimo Andrefana est de 66 813 km<sup>2</sup>. Elle est composée de 9 Districts qui sont Toliara I, Toliara II, Betioky Sud, Benenitra, Ampanihy Ouest, Beroroha, Morombe, Ankazoabo Sud et Sakaraha, de 121 communes et de 1 723 Fokontany. Le recensement fait dans cette région en 2018 donne 1 797 894 habitants et une densité démographique moyenne de 27 habitants par km<sup>2</sup>. En 2010, la majorité de la population d'Atsimo Andrefana sont des ruraux (77 %) et elles ont l'agriculture comme principale occupation car 7 travailleurs sur 10 se focalisent sur ce secteur d'activité (CREAM, 2013).

### ***Contexte climatique***

Le climat de la Région d'Atsimo Andrefana est semi-aride. Une saison sèche s'étalant de 7 à 9 mois et une saison pluviale plus courte, parfois aléatoire, et souvent très irrégulière se rencontrent dans cette région pendant toute l'année. Elle a une faible précipitation, moins de 600 mm/an, qui est l'une des caractéristiques de cette région. La température moyenne est de 24,6 °C avec un maxima de 30 °C et un minima de 10 °C (CREAM, 2013).



**Figure 1.** Carte de localisation de la région d'Atsimo Andrefana et les stations pluviométriques (Source : Service météorologique de Madagascar, Foiben-Taosarintanin 'i Madagascar, Auteur(2024))

## Méthodologies

La modélisation des données utilisant la SPI permet de donner les caractérisations à priori des sécheresses. Elle donne un aperçu sur les procédures de calcul et l'utilisation de SPI. C'est une étape importante nécessaire pour avoir une prédiction des quantités de précipitations en dessous de la normale dans une région, comme le cas de l'Atsimo Andrefana de Madagascar.

## Définition de la sécheresse

Plusieurs définitions de la sécheresse sont retrouvées dans la littérature. Mais Selon Palmer en 1965, la définition de la sécheresse varie en fonction de l'intérêt particulier de l'étude. Quant au paysan, elle désigne un manque d'humidité dans la partie de la racine de la culture. L'hydrologue la propose comme de niveau d'eau qui est inférieur à la moyenne dans les cours d'eau, dans les lacs et dans les réservoirs d'eau. Selon l'économiste, elle marque une pénurie d'eau qui nuit à l'économie établie.

## Classification des définitions de sécheresse

***Les définitions se regroupent en fonction des facteurs d'influence comme la précipitation, évapotranspiration, la météorologie, le débit, l'humidité du sol et la végétation.***

Les définitions qui sont basées sur la précipitation, l'évapotranspiration et la météorologie se réfèrent à la sécheresse météorologique. Celle qui est en fonction du débit se réfère aux sécheresses hydrologiques et celles qui sont en fonction de l'humidité du sol et la végétation se rapportent aux sécheresses agricoles.

***Indice de sécheresse***

L'indice de sécheresse est une valeur numérique qui est en relation avec des effets cumulatifs du prolongation et d'anomalie. En hydrologie, il montre la différence entre les niveaux des cours d'eau, des lacs et des réservoirs avec leurs valeurs moyennes. En agriculture, les effets cumulatifs d'un déficit de transpiration absolue ou anormale sont en rapport avec cet indice.

***Types d'indice de sécheresse***

Les indices les plus utilisés sont l'indice de l'écart à la moyenne (Em), le Rapport à la Normale des précipitations (RN), l'indice de déficit pluviométrique (Indice de l'Ecart à la Normale (En)), l'indice de sévérité de la sécheresse de Palmer, l'Indice de Pluviosité (Ip), l'indice d'approvisionnement en eau de surface (SWSI), l'indice de sécheresse de Keetch Byram (KBDI) et l'indice de précipitation standardisé (SPI). Mais cette étude s'intéresse seulement sur l'indice de Précipitation standardisé (SPI).

***L'Indice Standardisé de Précipitation (SPI)***

L'Indice Standardisé de Précipitation (SPI) a été développé en 1993 par Mc Kee, N.J. Doesken & J. Kleist de l'Université de l'Etat du Colorado, pour la détermination des déficits pluviométriques pour une période donnée (McKee et al., 1993). C'est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes humides que les périodes sèches (OMM, 2012).

***Procédure de calcul et utilisation du SPI***

Le SPI d'une région se calcule par le relevé de la série temporelle de précipitations cumulée, sur une échelle de temps donnée dans cette région. Cette série est de préférence sur une période d'au moins de 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans, voire plus, ce qui constitue la période optimale (Guttman, 1994) (McKee et al., 1993). Elle devrait être ajustée à une loi de

probabilité adéquate et transformée après à la distribution normale de moyenne égale à 0 et d'écarte type égale à 1, appelée Z-distribution, qui dans notre cas le SPI (Edwards and McKee, 1997). Le SPI a de valeurs positives pour des précipitations supérieures à la médiane et négatives pour les précipitations inférieures à la médiane.

Thom a conclu en 1966 que les précipitations sont adaptées beaucoup plus sur la loi gamma. Cette loi est définie par sa fonction de densité de probabilité donnée par la formule suivante (Edwards and McKee, 1997), pour  $x > 0$  :

$$g(u) = \frac{1}{\beta^a \Gamma(a)} u^{a-1} e^{-\frac{u}{\beta}} \quad (1)$$

Dont  $a$  est le paramètre de forme,  $b$  est le paramètre d'échelle,  $u$  est la quantité de précipitations et  $\Gamma(a)$  est la fonction gamma, définie par la formule :

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} v^{a-1} e^{-v} dv \quad (2)$$

L'ajustement de la distribution gamma se fait par déterminer les paramètres  $a$  et  $b$  qui sont estimés par Thom, en 1966 par :

$$\hat{a} = \frac{1}{4X} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4X}{3}} \right) \quad (3)$$

$$\hat{b} = \frac{u}{\hat{a}} \quad (4)$$

$$X = \ln \ln (\underline{u}) - \frac{\sum \ln \ln (u)}{k} \quad (5)$$

Où  $\underline{u}$  est la moyenne de précipitations et  $k$  est le nombre d'observations.

La valeur de la probabilité cumulée  $G(u)$  est obtenue par intégration de la fonction de densité  $g(u)$ , avec les deux paramètres  $a$  et  $b$  estimés. Cette valeur donne la probabilité d'observation d'une quantité de précipitation (inférieure ou supérieure à la médiane) pour un mois et une échelle de temps bien définis. Elle est donnée pour  $u > 0$  par :

$$G(u) = \int_0^u g(u) du = \frac{1}{\beta^a \Gamma(a)} \int_0^u u^{a-1} e^{-\frac{u}{\beta}} du \quad (6)$$

Etant donnée que la fonction de distribution gamma n'est pas définie sur 0 ainsi que pour le total de précipitation qui pourrait être est égal à 0 sur l'échelle de temps déterminée, la valeur de probabilité cumulée est donnée par la formule suivante :

$$H(u) = p + (1 - p)G(u) \quad (7)$$

Avec  $p = P(u = 0) > 0$  est la probabilité d'obtenir des précipitations nulles. La transformation de la fonction  $H(u)$  en distribution normale standardisée correspond à la valeur du SPI. Cette transformation peut être encore approximée par les formules suivantes (Abramowitz, 1965) :

$$z = SPI = - \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (8)$$

Et  $t = \sqrt{\ln \ln \left( \frac{1}{(H(u))^2} \right)}$  Pour  $0 < H(u) \leq 0,5$  (9)

$$z = SPI = + \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad (10)$$

Et  $t = \sqrt{\ln \ln \left( \frac{1}{(1-H(u))^2} \right)}$  Pour  $0,5 < H(u) \leq 1$  (11)

Et :

$$\begin{aligned} c_0 &= 2.515517; & c_1 &= 0.802853; & c_2 &= 0.010328. \\ d_1 &= 1.432788; & d_2 &= 0.189269; & d_3 &= 0.001308. \end{aligned}$$

Le calcul s'effectue séparément pour chaque échelle de temps, en général, il se fait sur 3, 6, 12 et 24 mois. Comme l'indice est dans ce cas normalisé, en effet, la représentation des climats plus humide et plus sec pourrait être faite de la même manière. La sécheresse commence quand la valeur du SPI est inférieure ou égale à -1 et elle se termine quand cette valeur devient positive.

**Tableau 1.** Probabilité d'occurrence des catégories climatique selon McKee et al 1993

<i>SPI</i>	<i>Catégorie</i>	<i>Nb. des fois sur 100</i>	<i>Fréquence</i>
De 0 à 0.99	Légère sécheresse	33	1 fois tous les 3 ans
De -1.00 à -1.49	Sécheresse modérée	10	2 fois tous les 10 ans
De -1.5 à -1.99	Grande sécheresse	5	3 fois tous les 20 ans
<-2	Sécheresse extrême	2	4 fois tous les 50 ans

L'Organisation Mondiale de la Météorologie a adopté 7 classes de climat différentes. Elles varient de l'extrême chaude à l'extrême humide dont montre le tableau suivant :

**Tableau 2.** Valeurs de SPI et classes de sécheresse(OMM, 2012)

<i>Valeur SPI</i>	<i>Séquence de sécheresse</i>
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
-2.0 et moins	Extrêmement sec

Les anomalies, c'est-à-dire, les écarts par rapport à la moyenne, des précipitations totales observées pour une zone, pendant une période donnée, sont montrées par le SPI. La probabilité de la gravité d'un événement humide ou sec est mesurée par l'ampleur de l'écart par rapport à cette anomalie. Puisque le calcul de SPI peut se faire sur différentes périodes d'accumulation de précipitations, qui sont généralement de 1 à 48 mois, il permet à l'estimation des impacts potentiels d'une sécheresse météorologique :

**SPI-1 à SPI-3 mois** : l'utilisation de ces SPI sont préférables pour des périodes d'accumulation de précipitations plus courtes, de 1 à 3 mois par exemple. Ils sont comme des indicateurs des impacts immédiats tels que la réduction de l'humidité du sol, du manteau neigeux, et l'écoulement dans des plus petits ruisseaux.

**SPI-3 à SPI-12 mois** : Ces SPI sont utilisés pour des périodes d'accumulation moyennes, de 3 à 12 mois par exemple, pour voir la réduction du débit des cours d'eau et du stockage dans les réservoirs.

**SPI-12 à SPI-48 mois** : ces SPI sont pratiqués pour des périodes d'accumulation plus longues de 12 à 48 mois par exemple, ils peuvent être considérés comme indicateur d'une recharge réduite des réservoirs et des eaux souterraines.

### ***Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle interannuelle***

Le SPI-12 mois doit être utilisé pour la caractérisation des années sèches. Le modèle de précipitation à long terme a été reflété à cette échelle de temps par ce SPI. Il fait comparer le cumul des précipitations des 12 mois consécutifs avec celle de la moyenne du même mois sur toutes les années de la série temporelle des données disponibles. Cela signifie que le SPI-12 de la fin janvier 2023 compare le total des précipitations de la période Décembre 2022 à janvier 2023 avec la même période dans la série temporelle.

### ***Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle intra saisonnière SPI-3***

Le SPI-3 mois produit des informations sur le cumul sur de trois mois avec le total de précipitations de la même période de trois mois sur toutes les années de la série temporelle. Ce qui implique que le SPI-3 mois de la fin du mois de Juin compare le total des précipitations de Avril – Mai – Juin de cette saison avec le total des précipitations de mois d'Avril au Juin pour toute la saison dans la série temporelle étudiée.

### ***Etude de la sécheresse en fonction de l'échelle mensuelle SPI-2***

Le SPI -2 mois donne la comparaison entre la précipitation de cette période avec la même période de deux mois sur toutes les années de la série temporelle. C'est-à-dire que le SPI-2 mois de la fin du mois d'Août compare le total des précipitations de la période Juillet-Août, le raisonnement est

toujours le même pour la fin de mois Septembre, en faisant la comparaison entre le total des précipitations de la période Août-Septembre avec tout le total de la même période. Le SPI-2 mois est ici utilisé, pour la saison chaude et pluvieuse de Novembre à Avril, de la fin du mois de Novembre pour le début de la pluie et Avril pour la fin de la pluie.

### Données et logiciels utilisés

Les données utilisées sont de données pluviométriques dans les relevés mensuels de précipitation, du mois de janvier 1990 jusqu’au mois de mai 2022 dans la Région d’Atsimo Andrefana, ex-Province de Toliara, se trouvant dans le Sud-Ouest de Madagascar, fournies par le Service météorologique de Madagascar. Elles recouvrent 396 observations sur 33 ans.

Les logiciels utilisés pour les traitements sont le PyCharm 2022.3.1 (Community Edition) et SPI Generator, version 1.7.6.

### Résultats et discussions

Pour analyser et évaluer les variations afin d’avoir les catégories, l’occurrence et la fréquence de la sécheresse météorologique dans la Région d’Atsimo Andrefana de Madagascar, les SPI-03, 06, 09, 12 et 48 mois sont calculés à partir des données de précipitation mensuelle sur une série de 33 années. Les résultats sont représentés par des graphes et tableaux suivants :

#### SPI-03 mois

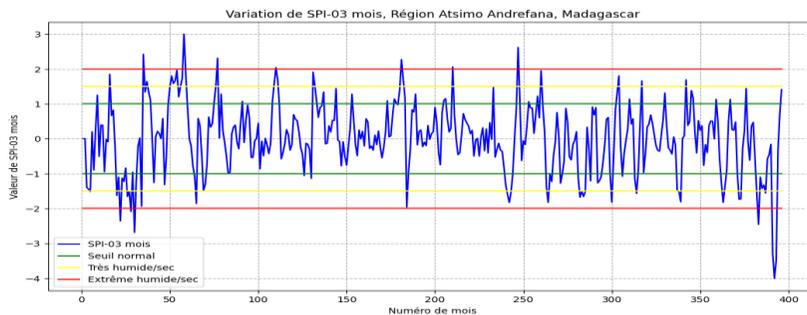


Figure 2. Variation de SPI-03 mois

Tableau 3. Probabilité d’occurrence de catégories climatiques par SPI-03 mois

SPI03	Catégories	Nb évènements de sécheresse	Nb des fois sur 100 ans	Fréquence
$0 > SPI > -0,99$	Sécheresse légère	43	130	13 fois tous les 10 ans
$-1 > SPI > -1,49$	Sécheresse modérée	13	39	13 fois tous les 33 ans
$-1,5 > SPI > -1,99$	Sécheresse sévère	15	45	9 fois tous les 20 ans
$SPI < -2$	Sécheresse extrême	5	15	5 fois tous les 33 ans

Selon les résultats de SPI03-mois, sur une série de données de 33 ans, 76 épisodes de sécheresses sont constatés, les épisodes de la sécheresse légère sont les plus dominants, ils occupent 56,58% des cas. Par contre, les épisodes de la sécheresse extrême sont les moins dominants, ils représentent 6,58% des cas. Les événements de sécheresse sévère sont aussi non négligeables, car ils représentent les 19,74% des cas.

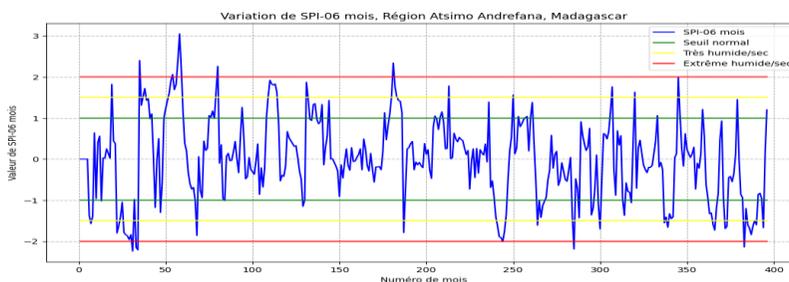
Ces résultats montrent qu'il y a 9 épisodes de sécheresse sévère tous les 20 ans et 5 épisodes de sécheresse extrême tous les 33 ans. Leur durée maximale est d'environ de 3 mois. (Sécheresse sévère : juin au septembre 2013, sécheresse extrême : juillet au septembre 2022).

Les sécheresses extrêmes sont identifiées en mois d'octobre 1991, en mois d'avril et juin 1992, en octobre au novembre 2021 et en juillet au septembre 2022 dont l'intensité maximale est plus de 4 (Août 2022).

En ce qui concerne l'humidité, ces résultats montrent 7 épisodes extrêmement humides qui se sont manifestés entre le mois de novembre 1992 jusqu' au mois de juillet 2010. La durée de l'un des épisodes est d'environ de 1 mois et l'intensité maximale est de 3 (octobre 1994). Ils montrent aussi 8 épisodes très humides se localisant en avril 1991 jusqu'au mois de juin 2018.

Selon la courbe, les phénomènes d'humidité extrême se présentent de novembre 1992 jusqu' au mois de juillet 2010, et ceux de très humide se présentent au mois d'avril 1991 jusqu'au mois de juin 2018. Jusque-là, la courbe ne dépasse plus le seuil du très humides.

### *SPI-06 mois*



**Figure 3.** Variation de SPI-06 mois

**Tableau 4.** Probabilité d'occurrence de catégorie climatique par SPI-06 mois

<i>SPI06- mois</i>	<i>Catégories</i>	<i>Nb évènements de sécheresse</i>	<i>Nb des fois sur 100 ans</i>	<i>Fréquence</i>
0>SPI>- 0,99	Sécheresse légère	37	112	28 fois tous les 25 ans
-1>SPI>- 1,49	Sécheresse modérée	16	48	12 fois tous les 25
-1,5>SPI>- 1,99	Sécheresse sévère	14	42	14 fois tous les 33 ans
SPI<-2	Sécheresse extrême	5	15	5 fois tous les 33

Les résultats de SPI-06 mois montrent que, sur une série de 33 ans, 72 épisodes de sécheresses sont constatés, les épisodes de la sécheresse légère sont les plus dominants, ils occupent 51,39% des cas. Par contre, les épisodes de la sécheresse extrême sont les moins dominants, ils représentent 6,94% des cas. Les évènements de sécheresse sévère représentent les 19,44% des cas.

Ces résultats montrent qu'il y a 14 épisodes de sécheresse sévère et 5 épisodes de sécheresse extrême tous les 33. Leurs durées maximales sont respectivement d'environ 6 mois (Février-Août 1992) et 1 mois (septembre-octobre 1992).

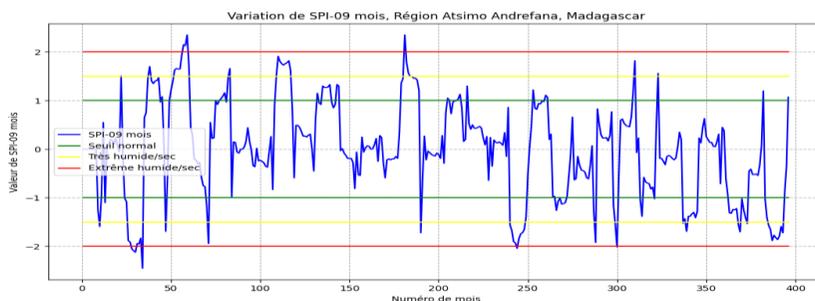
Les sécheresses extrêmes sont identifiées en mois de juin au juillet 1992 et au mois de septembre au octobre 1992, en mois d'avril 2010, septembre 2013 et en novembre 2021 dont l'intensité maximale est d'environ de 2,24(juillet 1992).

En ce qui concerne l'humidité, ces résultats montrent 4 épisodes extrêmement humides qui se sont manifestés au mois de novembre 1993, juin et octobre 1994 et janvier 2005. La durée des épisodes est presque 1 mois et l'intensité maximale est de 3,05(octobre 1994). Ils montrent aussi 7 épisodes très humides se localisant en septembre 1991 jusqu'en octobre 2018.

Les résultats montrent que les valeurs de pic sur l'humidité ont tendance à décroître avec le temps, les 3 pics très remarquables sont en octobre 1994(SPI=3,05), en janvier 2005(SPI=2,3) et en septembre 2018(SPI=1,98).

Selon la courbe, les phénomènes d'humidité extrême se présentent en novembre 1992 jusqu' au février 2005, et ceux de très humide se présentent en juillet 1991 jusqu'au mois d'octobre 2018. Jusque-là, la courbe ne dépasse plus le seuil du très humides.

### SPI-09 mois



**Figure 4.** Variation de SPI-09 mois

**Tableau 5.** Probabilité d'occurrence de catégorie climatique par SPI-09 mois

<i>SPI09-mois</i>	<i>Catégories</i>	<i>Nb évènements de sécheresse</i>	<i>Nb des fois sur 100 ans</i>	<i>Fréquence</i>
$0 > SPI > -0,99$	Sécheresse légère	26	79	79 fois tous les 100 ans
$-1 > SPI > -1,49$	Sécheresse modérée	8	24	6 fois tous les 25ans
$-1,5 > SPI > -1,99$	Sécheresse sévère	11	33	1 fois tous les 3 ans
$SPI < -2$	Sécheresse extrême	4	12	4 fois tous les 33ans

Les résultats de SPI-09 mois montrent que, sur une série de 33 ans, 49 épisodes de sécheresses sont constatés, les épisodes de la sécheresse légère sont les plus dominants, ils occupent 53,06% des cas. Par contre, les épisodes de la sécheresse extrême sont les moins dominants, ils représentent 8,16% des cas. Les évènements de sécheresse sévère représentent les 22,45% des cas.

Ces résultats montrent qu'il y a au moins un épisode de sécheresse sévère tous les 3 ans et 4 épisodes de sécheresse extrême les tous les 33. Leurs durées maximales sont respectivement d'environ 9 mois (janvier-septembre 2022) et 3 mois (avril-juillet 1992).

Les sécheresses extrêmes sont identifiées en mois d'Avril jusqu'au mois de Juillet 1992, au mois de septembre jusqu'au mois d'octobre 1992, en Avril 2010 et en Décembre 2014 dont l'intensité maximale atteint plus de 2,45 (octobre 1992).

En ce qui concerne l'humidité, ces résultats montrent 2 épisodes extrêmement humides : l'un s'est manifesté aux mois d'Août jusqu'au mois de décembre 1994, avec une durée de 3 mois et une intensité maximale de 2,35 et l'autre s'est présenté aux mois de janvier jusqu'au février 2005. Ils ont presque la même intensité. Les résultats montrent aussi que 7 épisodes très

humides ont été localisés depuis le mois d'octobre 1991 jusqu'au mois de novembre 1996.

D'après la courbe, les valeurs de pic sur l'humidité ont tendance à diminuer avec le temps : elle a une intensité de 2,35 en janvier 2005, de 2,82 en octobre 2015, de 1,56 en novembre 2016, de 1,2 en octobre 2021 et de 1,07 en décembre 2022.

Selon la courbe, les phénomènes d'humidité extrême se présentent en août 1994 jusqu' au février 2005, et ceux de très humide se présentent en novembre 1991 jusqu'au mois novembre 2016. Jusque-là, la courbe ne dépasse plus le seuil du très humide.

### SPI-12 mois

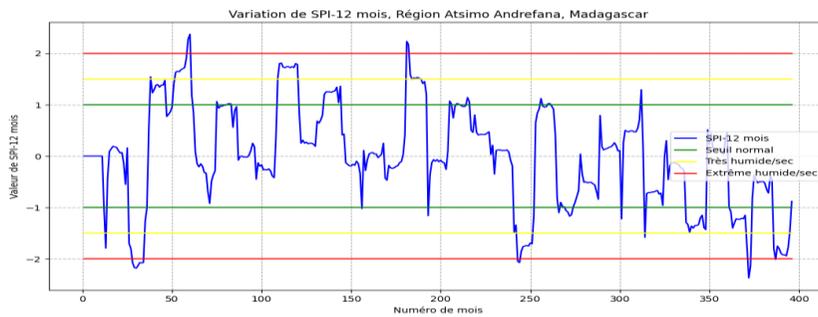


Figure 5. Variation de SPI-12 mois

Tableau 6. Probabilité d'occurrence de catégorie climatique par SPI-12 mois

SPI12-mois	Catégories	Nb évènements de sécheresse	Nb des fois sur 100 ans	Fréquence
$0 > SPI > -0,99$	Sécheresse légère	15	45	9 fois tous les 20 ans
$-1 > SPI > -1,49$	Sécheresse modérée	8	24	6 fois tous les 25 ans
$-1,5 > SPI > -1,99$	Sécheresse sévère	5	15	5 fois tous les 33 ans
$SPI < -2$	Sécheresse extrême	4	12	4 fois tous les 33 ans

Les résultats de SPI-12 mois montrent que, sur une série de 33 ans, 32 épisodes de sécheresses sont constatés, les épisodes de la sécheresse légère sont les plus dominants, ils occupent 48,88% des cas. Par contre, les épisodes de la sécheresse extrême sont les moins dominants, ils représentent 12,50% des cas. Les évènements de sécheresse sévère représentent les 15,63% des cas.

Ces résultats montrent qu'il y a 5 épisodes de sécheresse sévère et 4 épisodes de sécheresse extrême tous les 33. Leurs durées maximales sont

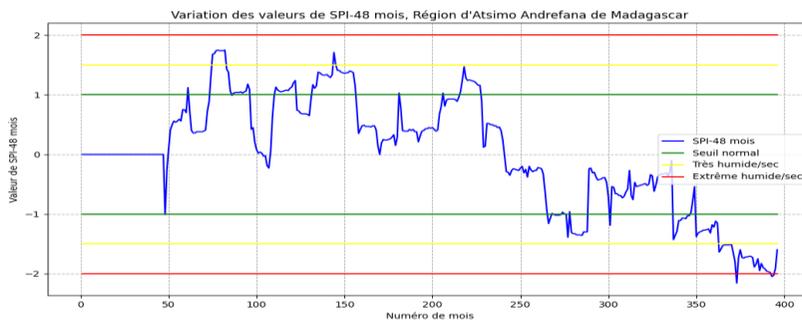
respectivement d'environ 7(mars-octobre 2022) mois et 6,5 mois (avril-octobre 1992).

Les sécheresses extrêmes sont identifiées en mois d'avril jusqu'au mois d'Octobre 1992, en mars jusqu'au mois d'avril 2010, en novembre 2020 jusqu'au mois de janvier 2021 et au mois de mars 2022. L'intensité maximale est plus de 2,35(décembre 2020).

En ce qui concerne l'humidité, ces résultats montrent 2 épisodes extrêmement humides : l'un s'est manifesté au mois d'octobre jusqu'au mois de Décembre 1994, avec une durée de 2 mois et une intensité maximale de 2,37 et l'autre s'est présenté aux mois de janvier jusqu'au mois de février 2005, avec une durée d'environ de 1,5 mois. Ils montrent aussi 2 épisodes très humides l'un s'est passé en février 1993 et l'autre en janvier-décembre 1999 avec une durée de 11 mois. Ils ont aussi montré 10 épisodes modérément humides qui se localisent en février 1993 au décembre 2015. La valeur de SPI passe à 0 au mois de décembre 2019. Elle est devenue négative et n'est plus passée à l'humidité normale.

Selon la courbe, les phénomènes d'humidité extrême se sont présentés le mois d'octobre 1994 jusqu' au mois de février 2005, et ceux de très humide se sont présentés au mois de février 1993 jusqu'au mois de septembre 2005. Ceux d'humidité modérée se sont présentés au mois de février 1993 jusqu'au mois de décembre 2015. Jusque-là, la courbe ne dépasse plus le seuil de l'humidité modérée et à partir de décembre 2019, la courbe s'est passée au-dessous de 0, c'est-à-dire, elle s'est située en dessous de la sécheresse normale.

### **SPI-48 mois**



**Figure 6.** Variation de SPI-48 mois

**Tableau 7.** Probabilité d'occurrence de catégorie climatique par SPI-48 mois

<i>SPI48-mois</i>	<i>Catégories</i>	<i>Nb évènement de sécheresse</i>	<i>Nb des fois sur 100 ans</i>	<i>Fréquence</i>
0>SPI>-0,99	Sécheresse légère	8	24	6 fois tous les 25 ans

-1>SPI>-1,49	Sécheresse modérée	8	24	6 fois tous les 25 ans
-1,5>SPI>-1,99	Sécheresse sévère	2	6	2 fois tous les 33 ans
SPI<-2	Sécheresse extrême	2	6	2 fois tous les 33 ans

Les résultats de SPI-48 mois montrent que, sur une série de 33 ans, 20 épisodes de sécheresses sont constatés, les épisodes de la sécheresse légère et modérée sont les plus dominants, ils occupent les mêmes pourcentages de 40% des cas. Par contre, les épisodes des sécheresses sévère et extrême sont les moins dominants, ils représentent chacun les 10% des cas.

Ces résultats montrent qu'il y a 2 épisodes de sécheresse sévère et extrême tous les 25 ans. Leurs durées maximales sont respectivement d'environ de 20 mois (janvier 2021-août 2022) et de 2 mois (août-octobre 2022).

Les sécheresses sévères sont identifiées en mois de janvier 2021 et en mois d'août au mois d'octobre 2022 dont l'intensité maximale est plus de 2,16 (janvier 2021).

La durée la plus longue des épisodes de sécheresse sévères s'étale du mois de Janvier 2021 jusqu'au mois d'Août 2022.

En ce qui concerne l'humidité, ces résultats montrent 2 épisodes très humides : l'un s'est manifesté aux mois de février jusqu'au mois de Décembre 1996, avec une durée supérieure à 10 mois et une intensité maximale de 1,75 et l'autre s'est présenté aux mois de novembre jusqu'au mois de janvier 2002. Ils montrent aussi 8 épisodes modérément humides qui se sont passés entre janvier 1995 au décembre 2008. La valeur de SPI est passée à 0 au mois de janvier 2010. Elle est devenue négative et n'est plus revenue à l'humidité normale.

Selon la courbe, les phénomènes très humides se présentent entre le mois de février 1996 jusqu'au mois de janvier 2002. Ceux de l'humidité modérée s'est présentés du mois de janvier 1995 jusqu'au mois de décembre 2008. Depuis janvier 2010, la courbe est passée au-dessous de 0, c'est-à-dire, elle est en dessous de la sécheresse normale.

## Conclusion

Cette étude a permis de conclure que les sécheresses dans la région d'Atsimo Andrefana de 1990 à 2022 se sont caractérisées par des sécheresses légère, modérée, sévère et extrême. Pour une période d'accumulation de précipitation plus courte (SPI-03 mois), il se produit aux moins 13 épisodes de sécheresse légère tous les 10 ans, 13 épisodes de sécheresse modérée tous les 33 ans, 9 épisodes de sécheresses sévères tous les 20 ans et 5 épisodes de sécheresse extrême tous les 33 ans. Pour une période d'accumulation

moyenne (SPI-03 à SPI-12 mois), il présente 9 à 26 épisodes de sécheresse légère tous les 20 ans, 8 à 13 épisodes de sécheresse modérée tous les 33 ans, et 9 à 15 épisodes de sécheresse sévère tous les 33 ans, 4 à 5 épisodes de sécheresse extrême tous les 33 ans. Pour les périodes d'accumulation plus longues (SPI-12 à SPI-48 mois), les résultats exposent qu'il se manifeste 6 à 11 épisodes de sécheresse légère et 6 épisodes de sécheresse modérée tous les 25 ans, 2 à 5 épisodes de sécheresse sévère et 2 à 4 épisodes de sécheresse extrême tous les 33 ans. La probabilité d'occurrence des catégories climatiques dans cette étude dépasse largement celle de McKee et al en 1993. La sécheresse la plus sévère d'intensité maximale supérieur à 4 est constatée par SPI-03 mois en Août 2022.

Quant à l'humidité, la valeur de pic d'un épisode et le nombre des événements extrêmement humides et très humides diminuent avec le pas de temps utilisé, pendant 33 ans. Le SPI-03 mois a présenté 7 épisodes extrêmement humides et 8 épisodes de très humide. Le SPI-12 mois a présenté 2 épisodes d'extrêmement humides et 2 épisodes de très humide et le SPI-48 mois n'a présenté que 2 épisodes très humides.

Depuis juin 2018, SPI-03 mois a montré que la courbe ne dépasse plus le seuil de très humide. Depuis décembre 2019(SPI-12 mois) et janvier 2010(SPI-48 mois), les événements se situent au-delà de la sécheresse normale.

Cette expérience est encore limitée sur la caractérisation de sécheresse mais elle pourrait être une étape pour d'autres études comme la prévision de sécheresse par des méthodes plus efficaces comme l'utilisation du Réseau de Neurone Récurrente qui est approprié pour les données de série temporelle.

**Financement:** les auteurs n'ont pas bénéficié de financement tout au long de cette étude.

**Disponibilité des données :** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

**Conflits d'intérêts:** les auteurs n'ont pas déclaré de conflits d'intérêts.

### **Références:**

1. Abramowitz M, Stegun A(Eds), 1965. Handbook of Mathematical Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications, Inc., New York, USA.
2. Amnesty International, 2027 : Madagascar, le changement climatique cause de terribles souffrances et des morts.

3. Bovolo C., Blenkinsop S., Majone B., Zambrano B.-M., Fowler H., Bellin A., Burton A., Barceló D., Grathwohl P., Barth J, 2010: Climate change water resources and pollution in the Ebro basin. Towards an integrated approach. In : Barceló D., Petrovic M., eds. The Ebro River Basin, Springer-Verlag.
4. C. Edwards and T. B. McKee., 1997 Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales, Atmospheric Science, pp 634.
5. CREAM (Centre de Recherches, d'Etudes et d'Appui à l'Analyse économique à Madagascar), 2013 : Monographie Région Atsimo Andrefana, 208 pages.
6. Djerbouai Salim, 2016 : Méthodes de l'Intelligence Artificielle pour la prévision des sécheresses, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedienne, p7-11
7. Edwards DC, McKee TB, 1997: Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Colorado State University, Fort Collins. Climatology Report No. 97-2, CO, USA.
8. F. Djellouli, A. Bouanani, K. Baba-Hamed, 2019 : Caractérisation de la sécheresse et du comportement hydrologique au niveau du bassin versant de l'oued Louza (Algérie occidentale), TSM numéro 6, 114e année.
9. Guttman, N.B., 1994: On the sensitivity of sample L moments to sample size. Journal of Climate, 7(6):1026–1029.
10. INSTAT Madagascar, 2020 : RGPH3-Tome-02, 226 pages.
11. Jean-Etienne Bidou, Isabelle Droy, Patrick Rasolofo, 2007 : Pauvreté et vulnérabilité alimentaire dans le Sud de Madagascar : les apports d'une approche diachronique sur un panel de ménages.
12. McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist., 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, p 179-186.
13. OMM, 2012 : Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé, OMM-N° 1090,25p.
14. OMM. (2012). Organisation météorologique mondiale, Guide D'utilisat d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé, N° 1090, p25.
15. Palmer WC, 1965. Meteorological drought, Research Paper 45, Weather Bureau, U.S. Dep. Of Commerce, Washington, D. C., USA.
16. Paola Bettelli, 2021 : Ce que le monde a appris en fixant les objectifs de développement, dossier # 10.
17. Safari Shad M., Dashti Marvili M., Dashti Marvili M. (2013): Study of drought with SPI index (case study: Ghareh Chai and Karkheh

- basins). International Research Journal of Applied and Basic Sciences; 4(9): 2638-44.
18. Sandratirina Andriambolatiana, Mialisoa Randriamampianina, 2013 : Changement climatique : politique et perspectives à madagascar, Réalisation et publication par Friedrich-Ebert-Stiftung, juillet 2013.
  19. Thom HCS, 1966: A note on gamma distribution. Mont Weather Rev (86), p117-122.
  20. Zargar A., Sadiq R., Naser B., Khan F.-I,2011: A review of drought indices, Environmental Review; 19: 333-49.