

1. Analyse de la tendance saisonnière des précipitations

En observant les hauteurs des normales saisonnières dans le tableau 34-page 134, on remarque toujours que sur chaque saison (pluies et sèche) les valeurs diminuent instantanément en fonction des normales avançant dans le temps. En premier lieu on va analyser cette baisse par la courbe de tendance linéaire décennale saisonnière des normales, ensuite l'analyse saisonnière sur toute la série 1952-Juin 2017 de la station Antananarivo DMH de la région Analamanga. Le principe est la même que pour la tendance mensuelle, on va classer les observations, tracer la courbe de tendance et la droite en déterminant l'équation ; la pente de la droite sera la valeur de la tendance que l'on interprètera.

La tendance saisonnière décennale :

Pour analyser la tendance saisonnière décennale, nous avons tracé les Figure 63-a) et -b).

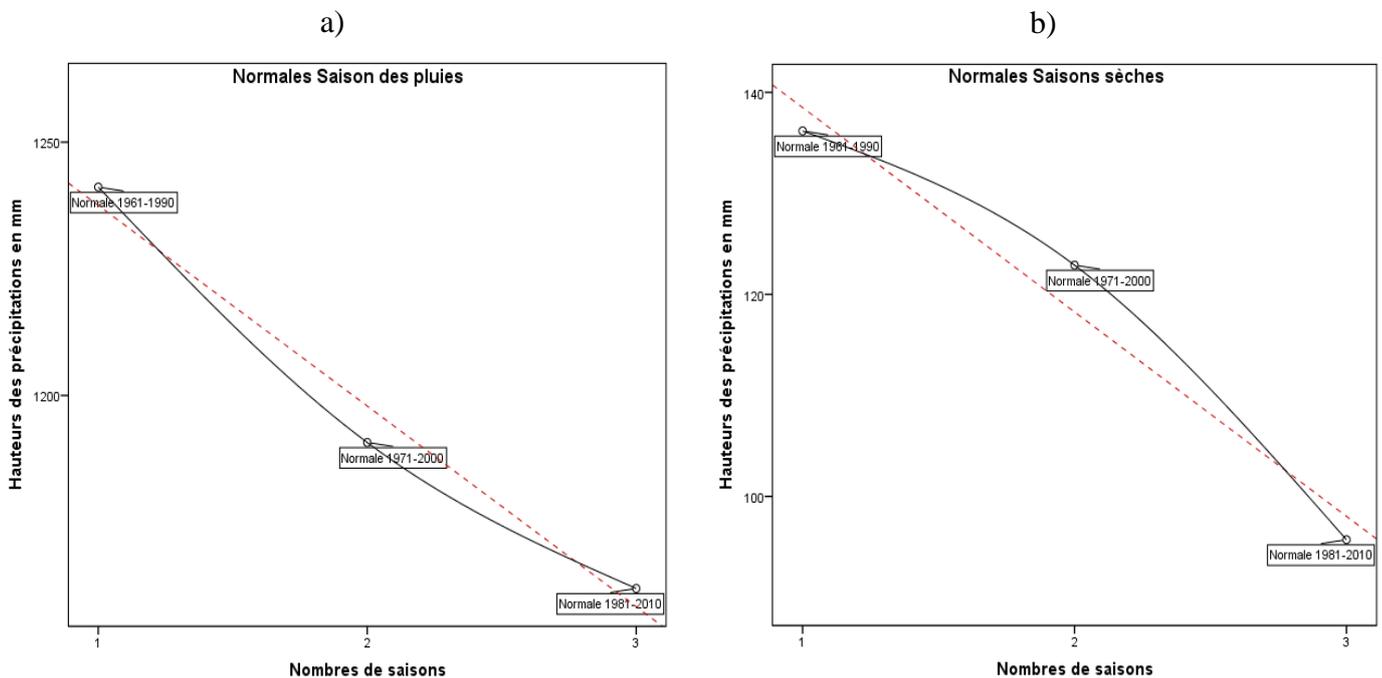


Figure 63 : Courbes en splines des normales saisonnières : 1961-1990, 1971-2000 et 1981-2010 classées en rang chronologiquement avec les droites de tendance linéaire.

Source : Auteur

A première vue, les figures justifient les faits, que ce soit pour la saison des pluies ou pour la saison sèche, les courbes de tendances linéaires sont toutes inclinées vers le bas. Les équations respectives des courbes de tendances de la saison des pluies et de la saison sèche : $y_{pluies} = 1277,146 - 39,615x$; $y_{sèche} = 158,729 - 20,233x$, les coefficients de détermination respectifs, $R^2_{ajusté}$: 0,952 et 0,924 avec y_{pluies} et $y_{sèche}$ désignant les hauteurs de précipitations des deux saisons et x : le rang des normales. Contrairement aux normales mensuelles, ici, on a des valeurs du coefficient de régression très significatif ; cela vient du fait de la ressemblance des normales. En outre, les tables ANOVA respectifs aux tableaux 37-38, nous confirme le rejet de H_0 puisque respectivement 0,099 et 0,125 sont supérieur à $\alpha=0,05$.

On peut aussi interpréter ce coefficient de détermination d'une autre manière, plus il tend vers 1 plus les précipitations présentent les mêmes variabilités ; ici, cela n'explique pas le fait que les normales saisonnières ont la même variabilité à l'échelle du temps, ceci vient du fait de la ressemblance de leurs moyennes.

Tableau 37 : Table ANOVA des normales des saisons des pluies.

Source : Auteur

ANOVA normale saisons des pluies					
	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Variation due au temps	3138.685	1	3138.685	40.434	0.099
Variation résiduelle	77.623	1	77.623		
Variation totale	3216.309	2			

Tableau 38 : Table ANOVA des normales des saisons sèches.

Source : Auteur

ANOVA normales saisons sèches					
	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Variation due au temps	818.759	1	818.759	25.439	0.125
Variation résiduelle	32.184	1	32.184		
Variation totale	850.944	2			

Une deuxième différenciation très marquée, est la valeur de la tendance linéaire respectivement $-39,615$ et $-20,233$ pour les saisons des pluies et sèche par rapport aux normales mensuelles. Ce qui veut dire qu'on a une baisse progressive des hauteurs des précipitations respectivement $39,615$ mm/saison/décennie et $20,233$ mm/saison/décennie pour les saisons des pluies et sèche. Sur un intervalle de confiance de 95%, on a respectivement avec les mêmes unités :

$$-118,774 < Trend_{NSpluies} < 39,544 \quad (61)$$

$$-71,204 < Trend_{NSsèches} < 30,738 \quad (62)$$

Ces valeurs sont plus considérables par rapport à la tendance mensuelles, mais elles ont les mêmes caractéristiques communes qui est la baisse des hauteurs de précipitations par rapport au temps. Ceci implique qu'on va avoir des saisons de pluies de plus en plus déficitaires et des saisons sèches du plus en plus arides. Par conséquent, il serait nécessaire et judicieux d'établir plusieurs réservoirs de stockages ou de retenues sur la région pour équilibrer et subvenir à la demande des ressources en eaux à long terme de la société.

La tendance saisonnière en générale :

Dans ce paragraphe, on adoptera les mêmes procédés utilisés précédemment. On peut remarquer sur les figures 64-a) et -b) que les droites de tendance linéaire s'inclinent vers le bas. On confirme encore la tendance à la baisse des précipitations. Les équations respectives des courbes de tendances de la saison des pluies et de la saison sèche : $y_{pluies} = 1281,255 - 2,60x$; $y_{sèche} = 129,055 - 0,590x$, les

coefficients de détermination respectifs, $R^2_{ajusté}$: 0,018 et 0,015 avec y_{pluies} et $y_{sèche}$ désignant les hauteurs de précipitations des deux saisons et x : le nombre de saison, en tout, nous avons 65 saisons des pluies et 64 saisons sèches vu que notre série de base se termine le mois de mai 2017. La valeur de la tendance linéaire respectivement $-2,60$ et $-0,590$ pour les saisons des pluies et sèche. Ce qui implique aussi la tendance à la baisse des hauteurs des précipitations respectivement 2,60 mm/saison et 0,590 mm/saison pour les saisons des pluies et sèche. Sur un intervalle de confiance de 95%, on a respectivement :

$$-6,148 < Trend_{S_{pluies}} < 0,948 \tag{63}$$

$$-1,455 < Trend_{S_{sèches}} < 0,256 \tag{64}$$

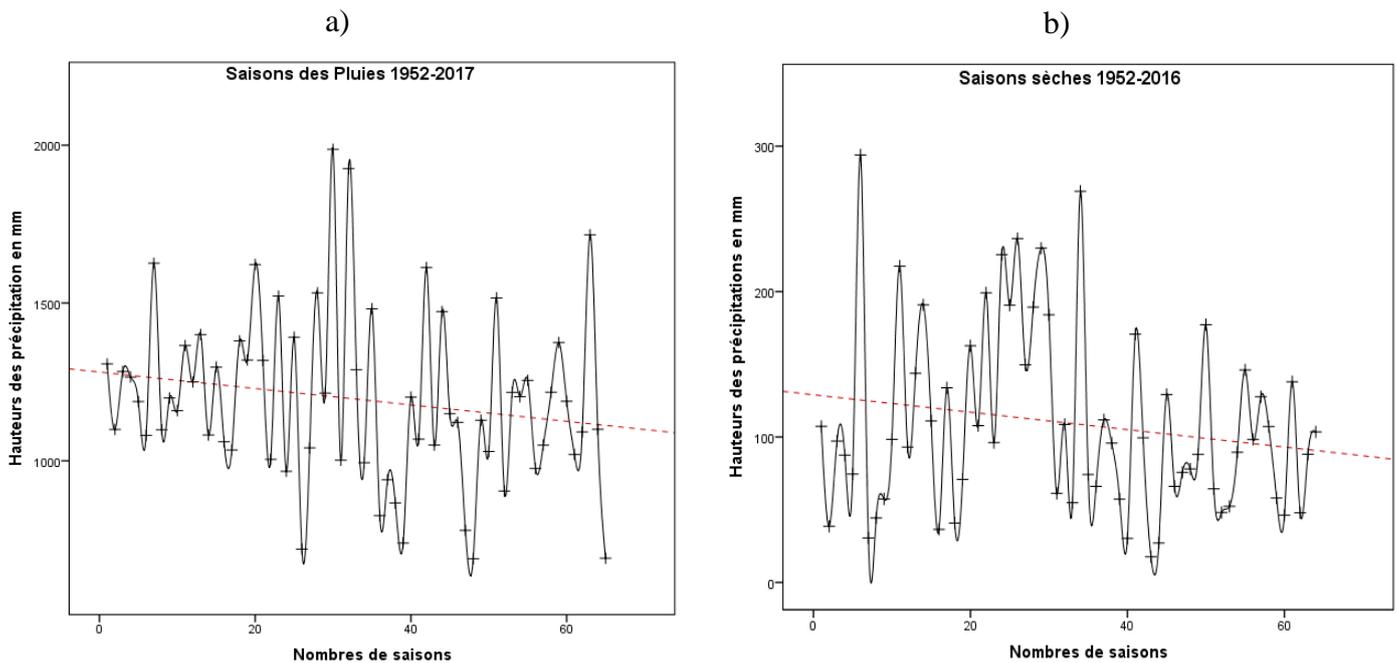


Figure 64 : Courbes en splines des précipitations saisonnières de la période de base 1952-2017 avec les droites de tendance linéaire.

Source : Auteur

A partir des tableaux 39 et 40, on traduit que les précipitations saisonnières n’ont pas la même variabilité à l’échelle du temps mais présente une tendance commune qui est à la baisse, on rejette H_0 puisque respectivement $0,166 > 0,148 > 0,05$. On peut aussi dire à partir des coefficients de détermination que seulement 1,8% de la variabilité des précipitations de la saison des pluies et 1,5% de celle de la saison sèche sont causées par le facteur temporel.

Tableau 39 : Table ANOVA des précipitations des saisons des pluies 1952-2017 en fonction du temps.

Source : Auteur

ANOVA Saisons des pluies 1952-2017					
	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Variation due au temps	154655.804	1	154655.804	2.143	0.148
Variation résiduelle	4544720.1	63	72138.414		
Variation totale	4699375.91	64			

Tableau 40 : Table ANOVA des précipitations des saisons sèches 1952-2016 en fonction du temps.

Source : Auteur

ANOVA Saisons Sèches 1952-2016					
	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Variation due au temps	7849.51413	1	7849.514	1.962	0.166
Variation résiduelle	248045.202	62	4000.729		
Variation totale	255894.716	63			

2. Caractérisation de la période d'étude par rapport aux normales saisonnières de référence

Ici, on va caractériser la saison ainsi que l'anomalie négative grâce aux écarts et rapport à la normale saisonnière de la période 1961-1990.

Les tableaux 41-a) et -b), représentent les écarts et rapports aux normales saisonnières de la période de référence sur la période d'étude. En observant les écarts, on conclut que la période d'étude est en fait généralement déficitaire. Ce déficit est légèrement marqué au deux premières saisons, mais elle est intense à la dernière saison, ce qui la caractérise par une saison des pluies particulièrement sèches d'après la valeur du rapport à la normale.

Tableau 41 : Ecart et rapport à la normale de la période d'étude 2016-2017.

Source : Auteur

a)

b)

Saison 2015-2016		
Saison	Saison des pluies	Saison sèche
Ecart	-141.4	-32.7
Rapport	0.886089401	0.760027347
Signification	Voisine de la normale	Voisine de la normale

Saison 2016-2017		
Saison	Saison des pluies	Saison sèche
Ecart	-549.9	
Rapport	0.556953216	
Signification	Sèche	

Pour conclure tous ce qui a été vue sur les variabilités et la tendance, on peut dire que la variabilité ne dépend pas du facteur temporel, les tables ANOVA démontrent toutes le rejet de H_0 . Cependant, la tendance y est bien marquée. On peut dire que les précipitations de la station Antananarivo DMH ont une tendance à la baisse par rapport au temps mais présente une grande variabilité qui est principalement causée par les facteurs spatiaux.

Section 4 Analyse de la sévérité de la sécheresse

A partir des statistiques descriptives, nous avons déterminer l'anomalie et sa période sur l'année 2016-2017. L'analyse des normales a permis de caractériser sa nature. Maintenant nous allons analyser les déficits de précipitations. Effectivement, comme nous l'avons défini dans la partie I : « La sécheresse est un épisode de manque d'eau plus ou moins long mais suffisant pour que les sols et la flore soient affectés ». Or, la manque d'eau est causée en générale par le déficit de précipitation sur une région. Explicitement, nous allons déterminer l'ampleur de la sécheresse en intensité et en période en analysant les SPI, c'est-à-dire, la sévérité de la sécheresse. Pour se faire, nous allons tout d'abord calculer les SPI

sur toute la période de base pour visualiser la répartition des périodes humides et sèches en classant le période d'étude. Ensuite, nous analyserons la période d'étude sur différentes échelles de temps des SPI.

I. Détermination des périodes humides et sèches

L'utilisation des SPI sur 12 mois serait judicieux puisque nous voulons représenter des régimes de précipitations à longue échéance. Notons aussi que l'année 2017 n'est pas achevée, par conséquent, nous ne pouvons pas faire des analyses annuelles. Vu que la fin de la série est le mois de Juin 2017, nous choisissons la période JASONDJFMAMJ pour la représentation des SPI sur 12 mois. Explicitement, ce sera une évaluation saisonnière sur 2 années consécutifs ; on calculera les SPI débutant du mois de Juillet de la première année et se terminant le mois de Juin de l'année suivante.

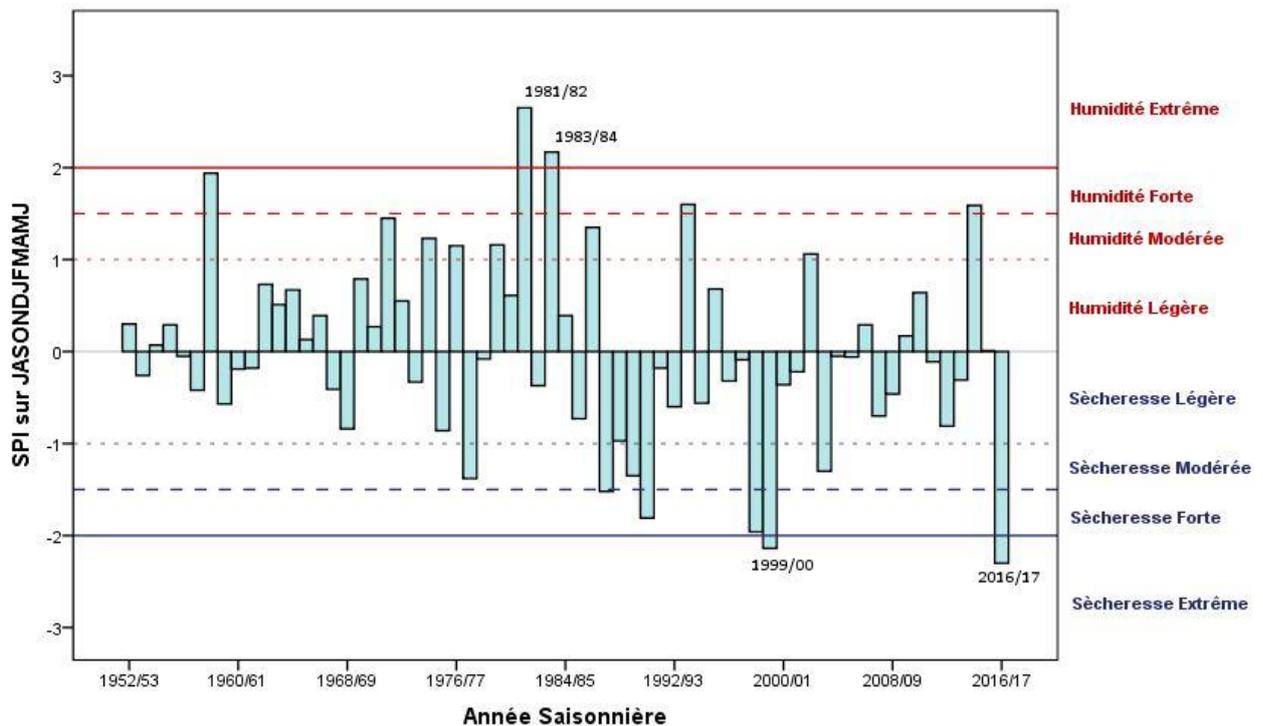


Figure 65 : Représentation des SPI sur 12 mois (JASONDJFMAMJ) de la série 1952 à Juin 2017.

Source : Auteur

Effectivement, la tendance à la baisse que nous avons démontrée en analysant la variabilité des précipitations à fait encore sa preuve sur la Figure 65 ; Tout d'abord, remarquons sur le graphique en barre l'augmentation de l'occurrence de la sécheresse et la rareté de l'humidité au fil du temps. Cette augmentation de fréquence est aussi proportionnelle à l'intensité. On constate que les successions de périodes sèches en série commencent à l'année saisonnière 1987/88, avant cette période la sécheresse se fait rare ; ce qui implique en effet la rareté des précipitations au fil du temps. La plus longue séquence de sécheresse va de l'année saisonnière 1987/88 jusqu' à 1992/93. On a aussi proportionnellement 2 extrêmes humides et sèches, respectivement : en 1981/82, 1983/84 et 1999/00 et 2016/2017. Ici, la période d'étude est définie comme étant une période de sécheresse extrême. Donc, l'anomalie négative

de la station Antananarivo DMH s'est caractérisée sous une sécheresse extrême, la plus extrême sur toute la série de base.

Tableau 42 : Tableau de classification des années saisonnières humides et sèches sur la période JASONDJFMAMJ de 1952 à Juin 2017

Source : Auteur

Humidité (périodes humides)				Sécheresse (périodes sèches)			
Légère	Modérée	Forte	Extrême	Légère	Modérée	Forte	Extrême
2015/16	2002/03	2014/15	1983/84	1988/89	1977/78	1998/99	2016/17
1954/55	1976/77	1993/94	1981/82	1975/76	1989/90	1990/91	1999/00
1965/66	1979/80	1958/59		1968/69	2003/04	1987/88	
2009/10	1974/75			2012/13			
1970/71	1986/87			1985/86			
1955/56	1971/72			2007/08			
2006/07				1992/93			
1952/53				1959/60			
1966/67				1994/95			
1984/85				2008/09			
1963/64				1957/58			
1972/73				1967/68			
1980/81				1982/83			
2010/11				2000/01			
1964/65				1973/74			
1995/96				1996/97			
1962/63				2013/14			
1969/70				1953/54			
				2001/02			
				1960/61			
				1961/62			
				1991/92			
				2011/12			
				1997/98			
				1978/79			
				2005/06			
				1956/57			
				2004/05			

Le tableau 42 ci-dessus représente les classements des périodes humides et sèches. Effectivement, la période d'étude se situe au rang de la sécheresse extrême. En se référant, au tableau de la probabilité d'occurrence dans la partie II chapitre 7, IV-2 qui affirme qu'on a probablement un évènement type une fois tous les 50 ans. Par analogie, le temps de retour que nous avons trouvé dans ce chapitre à la Section 2-II s'accorde avec ceci. Apparemment, la sécheresse de la période d'étude se définit comme étant à la fois une sécheresse météorologique, agricole et hydrologique ce qui a causé un bouleversement socio-économique en début de l'année 2017 en se manifestant par le retard des saisons des pluies, la baisse des rendements agricoles, l'assèchement des cours d'eau, l'insuffisance de la production d'énergie

hydro-électrique. De plus, on voit aussi que les périodes de sécheresse sont plus nombreuses que les périodes d'humidités. La tendance à la baisse des précipitations semble prendre une tournure relativement aigue.

II. Caractérisation de la sécheresse de l'année 2016-2017

Il est mentionné que : L'indice SPI indique qu'une sécheresse débute quand sa valeur est inférieure ou égale à -1,0 et se termine quand sa valeur devient positive. Nous allons détecter graphiquement le commencement de chaque type de sécheresse durant la période d'étude. A titre de rappel, une sécheresse météorologique est caractérisée par les SPI sur 1 mois, une sécheresse agricole par les SPI sur 3 mois et une sécheresse hydrologique par les SPI sur 9 mois. En analysant les SPI sur 9 mois, on peut en découdre si la sécheresse est saisonnière ou plutôt à long terme.

La Figure 66-a) représente les SPI sur 1 mois de la période d'étude. En observant sur le graphique, on déduit que la sécheresse météorologique débute le mois d'Août et se termine le mois de Mars ou l'indice redevient positif, ce qui confirme les différentes analyses déjà faits précédemment.

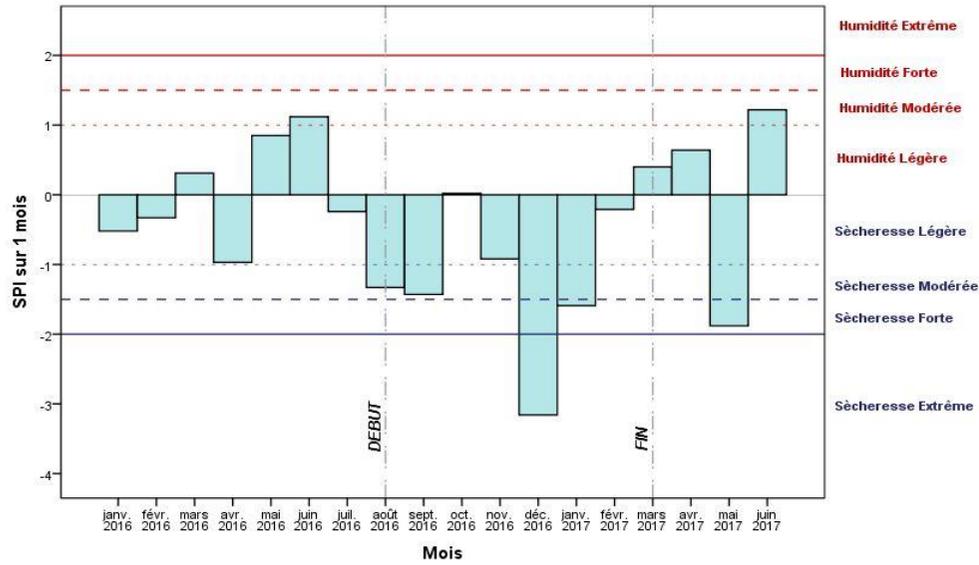
La Figure 66-b) affirme que la sécheresse agricole débute au 9^{ème} 3-mois consécutifs (Juillet-Août-Septembre 2016, le nombre 65 se définit comme étant la 65^{ème} année de la série de base) et se termine au 16^{ème} 3-mois consécutifs.

La Figure 66-c) indique le début à la 11^{ème} 6-mois consécutif (Juillet à Décembre 2016) mais prolonge la sécheresse n'indiquant pas la fin jusqu'à la dernière série.

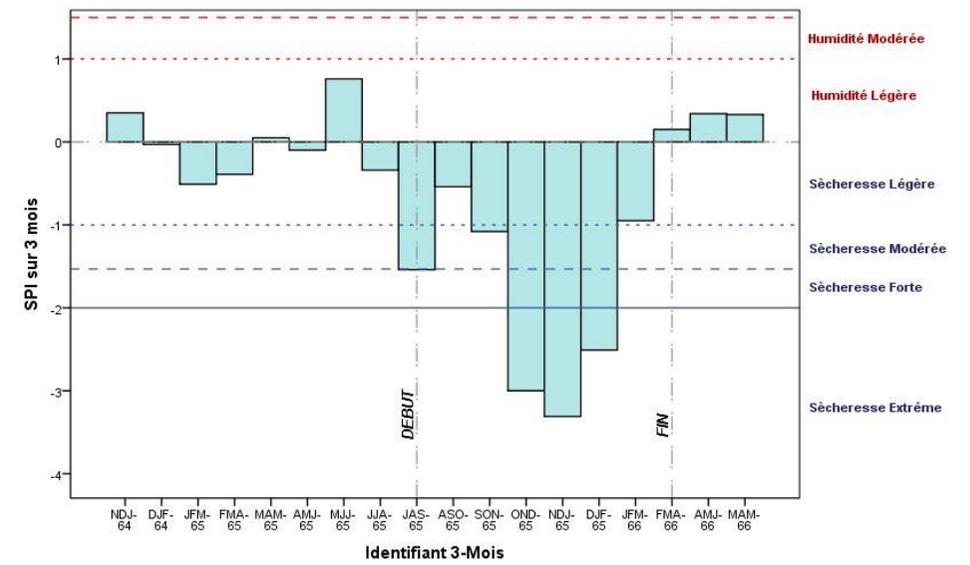
La Figure 66-d), comme précédemment indique juste le début à la 12^{ème} position (Avril à décembre 2016) mais ne présente pas la fin.

En récapitulant, la première constatation est la suivante : les indices SPI s'intensifient lorsque qu'on augmente la période. Plus concrètement, Les barres deviennent uniformes en fonction de la période. Les SPI sur 1 mois nous affirme que la sécheresse pluviométrique a duré 7 mois, ce qui signifie le retour à la normale du régime pluviométrique au mois de Mars 2017.

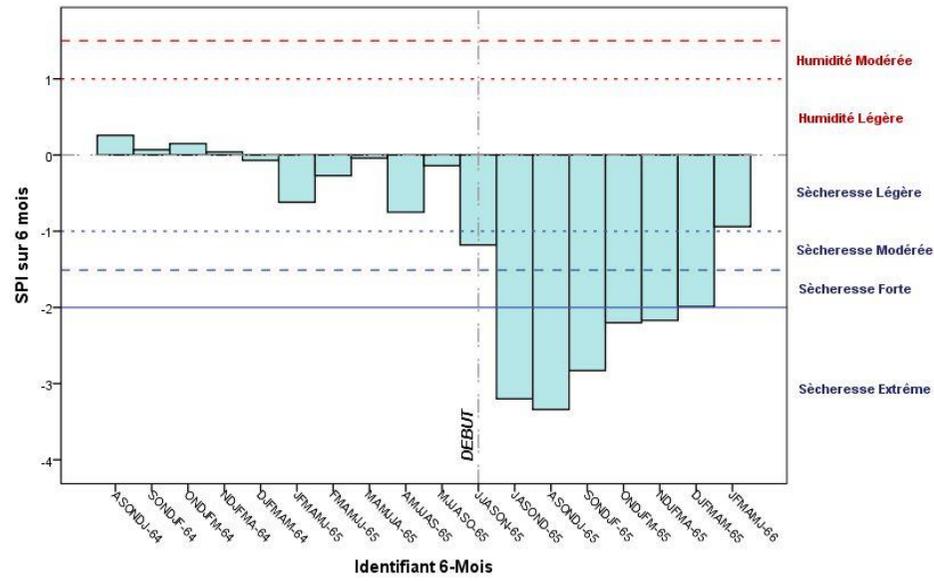
Les SPI sur 3 mois indique une sécheresse agricole durant 10 mois, ce qui veut dire que l'humidité du sol a commencé à diminuer le mois de Juillet 2016 et elle n'est point favorable à l'agriculture qu'au mois d'Avril ; Les SPI sur 3 mois nous informent aussi sur l'inactivité de la mousson d'été vue l'intensité extrême de la sécheresse. Les SPI sur 6 mois indique une durée de 13 mois et plus, cela signifie que la sécheresse agricole se poursuit indirectement, c'est-à-dire que les précipitations observées, mêmes si les SPI sur 1 mois indiquent le retour à la normale, ceci ne comble pas la réserve d'humidité du sol. On peut déduire aussi qu'une sécheresse de type hydrologique s'installe toute au long de cette période vue l'indétermination de la fin de la sécheresse.



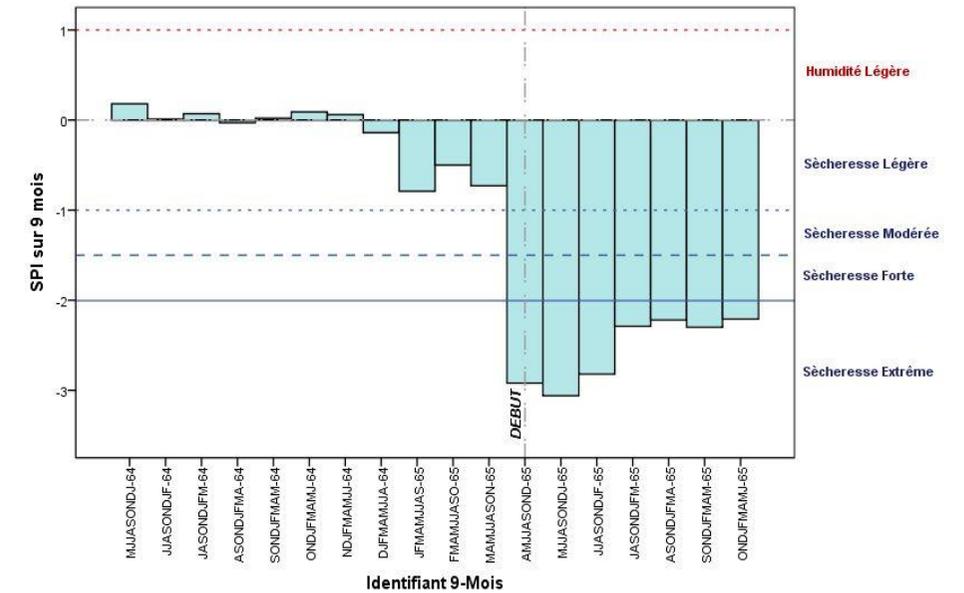
a)



b)



c)



d)

Figure 66 : Représentation des SPI sur 1, 3, 6, 9 mois sur la période d'étude.

Source : Auteur

Les SPI sur 9 mois confirme nos soupçons, effectivement, la sécheresse prend une toute autre forme, c'est la sécheresse hydrologique durant plus de 15 mois. De même que pour les SPI sur 6 mois, la fin est encore indéterminée ce qui signifie que toutes les réserves hydrologiques de la région sont encore déficitaires (inférieure à la normale).

Remarquons aussi que les pics de sécheresse sont communs au niveau de la période et de l'intensité, juste au milieu de la saison des pluies de l'année 2016-2017 respectivement : Décembre 2016 (SPI-1), Nov-Déc-Jan 2016-2017 (SPI-3), Août 2016 à Janvier 2017 (SPI-6), Mai 2016 à Janvier 2016 (SPI-9) ; on peut déduire que cette sécheresse saisonnière extrême est très marquée pendant la saison des pluies 2016-2017. Ces interprétations confirment les événements qui se sont produits durant la période d'étude.

Tableau 43 : Tableau récapitulatif de la sécheresse saisonnière extrême de l'année 2016-2017.

Source : Auteur

Indicateur	Durée	Magnitude	Intensité maximale	Fréquence	Sévérité	Type
SPI-1	7 mois	-8.62	-3.16	1 sur 50 ans	-0.21	Sécheresse météorologique
SPI-3	10 mois	-12.93	-3.31	1 sur 50 ans	-0.54	Sécheresse Agricole
SPI-6	>13 mois	<-17.85	-3.34	1 sur 50 ans	-0.94	Type confondu
SPI-9	>15 mois	<-17.82	-3.06	1 sur 50 ans	-2.21	Sécheresse Hydrologique

Sur le tableau 43, on a le récapitulatif de la sécheresse (les valeurs sans unités sont comptées en écart-type). Nous l'avons défini comme étant une sécheresse saisonnière puisque l'échelle de temps du déficit pluviométrique correspond à une saison. Par contre, une sécheresse hydrologique est le résultat d'un déficit pluviométrique prolongé qui conduit à une pénurie d'eau. La période de 7 mois est assez longue associée à l'intensité extrême ce qui a causé les 2 autres types de sécheresse (agricole et hydrologique). La persistance de ces deux-là se justifie par la sévérité et la magnitude qui augmente de façon significative en fonction de la période.

Une explication plus radicale pour la persistance de la sécheresse agricole et hydrologique : on observe sur les figures 66-c) et -d) respectivement que les SPI sur 6 mois indique une sécheresse légère tandis que les SPI sur 9 mois annonce une extrême en fin de période. Ce qui signifie que la sécheresse agricole continue modérément tandis que la sécheresse hydrologique est encore très accrue, ça s'explique que les réserves hydrologiques de la région surtout les nappes phréatiques sont presque vides même si le régime des précipitations est redevenu normal. Par conséquent, on assiste à des infiltrations rapides lors des jours de pluies ; puisque les couches inférieures sont vides. Sous l'effet de la gravité, l'eau de pluie s'infiltré jusqu'à saturation de ces couches inférieures laissant les couches supérieures plus sèches et notons que la nature pédologique de la région est essentiellement constituée de sols latéritiques plus ou moins perméables.

Il est aussi possible que d'autres facteurs amplifient cette sécheresse hydrologique, ce qui en effet le cas. Généralement, la région est extrêmement urbanisée ce qui diminue instantanément l'infiltration et augmente le ruissellement ; ce qui signifie que même si le régime des précipitations est normal, les

eaux ont tendances à être déviées vers d'autres régions ne pouvant subvenir aux réserves hydrologiques (réservoir, lacs, ...) que sur une période assez significative. En plus de tout ceci, la région a une consommation élevée d'eau dépassant les capacités de la nappe ou des réservoirs à se renouveler vue de la démographie élevée.

Par conséquent, il est vital de suivre l'évolution de ce type de sécheresse en particulier puisque nous avons déjà vue ses effets sur l'année 2016-2017. Sans prises de précautions adaptées, ceci constituera un impact néfaste sur le domaine socio-économique de la région à long terme.

Section 5 Synthèse de l'anomalie de précipitations de l'année 2016-2017

Les statistiques descriptives ont détecté les anomalies, les normales les ont quantifiées et les SPI les ont définies et mesurées. En fin de compte, l'anomalie est une sécheresse saisonnière extrême, persistante du mois d'Août 2016 jusqu'en Mars 2017 engendrant des sécheresses agricole et hydrologique dont la fin est à déterminer.

Les sécheresses de types météorologiques se produisent généralement lorsqu'un anticyclone s'installe durablement au-dessus d'une région à cause d'une situation de blocage. Les hautes pressions persistantes empêchent donc toute intrusion d'une perturbation atmosphérique et peuvent alors mener la région surplombée par celles-ci à une longue période de beau temps et donc avec un peu voire sans précipitations. Ce qui est typique des phénomènes ENSO et IOD, par définition les deux phénomènes se caractérisent par la modulation de la circulation de Walker qui produisent des zones de convergences (dépressions) et des zones de divergences (anticyclone) de part et d'autre des régions tropicales. Dans la suite, nous allons montrer les relations entre ces phénomènes et l'anomalie de précipitation.