



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

=====

INSTITUT NATIONALE DE L'EAU (INE)

=====



**DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES
RESSOURCES EN EAU**

Mémoire de fin de formation présenté par

OROU FICO Fridaous Jean Séro

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : HYDROLOGIE QUANTITATIVE

THEME

=====

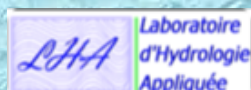
**CARACTERISATION DES POCHES DE SECHERESSE
EN ZONES CONTRASTÉES DU BENIN**

=====

Maître de Mémoire

Dr. Djigbo Félicien BADOU

....



PROMOTION : 2019 - 2022

DEDICACE

❖ *ma Grand-mère maternelle dite « Yaoguínù »*

❖ *ma mère*

REMERCIEMENTS

Avant tout développement, il apparaît opportun de commencer ce mémoire par des remerciements à l'endroit de tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Dans un premier temps, je remercie le Tout-puissant pour ces bienfaits dans ma vie et qu'il veille sur les miens. Aussi j'exprime ma reconnaissance toute particulière à mon superviseur le **Dr. Djigbo Félicien BADOU** pour le temps consacré à mon encadrement. Je tiens également à remercier le **Prof. Abdoukarim ALASSANE**, l'ancien chef du département d'hydrologie et gestion des ressources en eau et son successeur actuel **Prof. Flavien DOVONOU** pour tous les efforts consentis à la formation des étudiants sans oublier mes enseignants pour toutes les connaissances que j'ai acquises sous leurs encadrements respectifs durant ma formation en licence professionnelle d'hydrologie. Dans un second temps, je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à mes aînés surtout **AKAKPA Jean de Dieu** et **Freddy HOUNNONDAHO** ainsi qu'aux camarades pour les aides précieuses sans lesquelles je n'aurais pas pu en arriver là. Je tiens aussi à témoigner toute ma gratitude à ma famille et à mes proches pour leur soutien constant et leurs encouragements. En occurrence je cite :

- **In memorium OROU FICO Fortuné, mon père**
- **MEBOUNOU Anna, ma mère**
- **KORA ZAKI Lafia Soulé**
- **COUBEOU Pascal**
- **TANKAYA Amos**

RESUMÉ

Quarante-deux stations dont les six synoptiques ont été le centre d'analyse de notre étude en vue de caractériser l'évolution des poches de sécheresse à partir de leur occurrence dans le régime pluviométrique des grandes zones climatiques au Bénin. Sur la base des relevés pluviométriques journaliers pour la période allant de la création de chacune d'elle à 2021, la méthode par les chaînes de Markov d'ordre 2 et 3 a en premier lieu été appliquée pour l'ajustement de la distribution empirique de la probabilité de l'occurrence de chaque longueur. Ensuite le test statistique de Mann-Kendall modifié pour déterminer la tendance temporelle aux de seuil de 5% des poches de sécheresse et enfin la méthode d'interpolation par l'IDW a permis d'apprécier l'évolution des poches de sécheresse entre les zones climatiques du Bénin (sur la période de 1971 à 2021). Les résultats obtenus ont montré que la chaîne de MARKOV de 2^{ème} ordre donne un meilleur ajustement de la distribution des probabilités empiriques d'occurrence des poches de sécheresse pour tous les régimes pluviométriques du Bénin. L'évolution temporelle des poches de sécheresse dans le régime des pluies au Bénin a montré plus de tendances significatives croissantes des poches de durée inférieure à 10 jours (ou courte durée) dans la partie soudanienne du pays. Pour les poches de durée plus que 10 jours (ou longue durée) les tendances significatives positives obtenues ont été majoritaires dans la zone couverte par le régime bimodal. Enfin sur la période 1971-2021, l'occurrence des poches de courte durée a été en forte probabilité dans la zone soudanienne (à l'exception des régions de l'extrême Nord) que subéquatoriale ; surtout aux alentours de Natitingou. Inversement, les probabilités d'occurrence des poches de longue durée ont été moins forte dans la zone soudanienne et la région Est de la zone subéquatoriale.

Mots clés : Régime pluviométrique, Poches de sécheresse, Chaînes de Markov, Tests statistiques, Zones climatiques.

ABSTRACT

Forty-two stations, including the six synoptics ones, were the focus of our study in order to characterize the evolution of dry spells based on their occurrence in the rainfall regime of the major climatic zones in Benin. On the basis of daily rainfall records for the period from the creation of each of them to 2021, the second and third order Markov chain method was first applied to fit the empirical distribution of the probability of occurrence of each length. Then the modified Mann-Kendall statistical test was applied to determine the temporal trend at the 5% threshold of the dry spells and finally the IDW interpolation method was used to assess the evolution of the drought pockets between the climatic zones of Benin (over the period from 1971 to 2021). The results obtained showed that the 2nd order MARKOV chain gives a better fit to the distribution of empirical probabilities of occurrence of drought pockets for all rainfall regimes in Benin. The temporal evolution of drought pockets in Benin's rainfall regime showed more significant increasing trends of dry spells of duration less than 10 days (or short duration) in the Sudanian part of the country. For dry spells of duration more than 10 days (or long duration) the positive significant trends obtained were predominant in the area covered by the bimodal regime. Finally, over the period 1971-2021, the occurrence of dry spells of short duration was more likely in the Sudanian zone (with the exception of the extreme north) than in the sub-equatorial zone especially around Natitingou. Conversely, the probabilities of the occurrence of dry spells of long duration were less likely in the Sudanian zone and the eastern part of the sub-equatorial zone.

Keywords: Rainfall regime, Drought pockets, Markov chains, Statistical tests, Climatic zones.

SIGLES, ACRONYMES, et ABREVIATIONS

- AGVSA : Analyse Globale de la Vulnérabilité et de la Sécurité Alimentaire ;
- GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Expert sur l'Evolution du Climat ;
- INSAE : Institut National de la Statistique de l'Analyse Economique du Bénin ;
- Poches de CD : Poches de courte durée (moins que 10 jours) ;
- Poches de LD : Poches de longue durée (de 10 jours à plus) ;
- PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Situation géographique du Bénin.....	7
Figure 2: Zones climatiques du Bénin.....	8
Figure 3: Distribution empiriques des probabilités d'occurrence et par les ajustements des chaines de Markov pour le climat soudanien.	17
Figure 4: Distribution empiriques des probabilités d'occurrence et par les ajustements des chaines de Markov pour le climat de transition.	18
Figure 5: Distribution empiriques des probabilités d'occurrence et par les ajustements des chaines de Markov pour le climat subéquatorial.....	18
Figure 6: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de courte durée en régime unimodal.	21
Figure 7: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de courte durée en régime unimodal. (suite).....	22
Figure 8: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de courte durée en régime bimodal (grande saison des pluies).	24
Figure 9: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de courte durée en régime bimodal (petite saison de pluies).	26
Figure 10: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de longue durée en régime unimodal.	28
Figure 11: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de longue durée en régime bimodal (grande saison de pluies).	29
Figure 12: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de longue durée en régime bimodal (petite saison de pluies).	30
Figure 13: Probabilité de l'occurrence d'une poche de sécheresse de courte durée au Bénin (1971-2021).....	31
Figure 14: Probabilité de l'occurrence d'une poche de sécheresse de longue durée au Benin (1971-2021).....	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Tendances des poches de courte durée pour le régime unimodal.	19
Tableau 2: Tendances des poches de courte durée pour le régime bimodal (grande saison de pluies).	23
Tableau 3: Tendances des poches de courte durée pour le régime bimodal (petite saison de pluies).	25
Tableau 4: Tendances des poches de longue durée pour le régime unimodal.	27
Tableau 5: Tendances des poches de longue durée pour le régime bimodal (grande saison de pluies).	29
Tableau 6: Tendances des poches de longue durée pour le régime bimodal (petite saison de pluies).	30
Tableau 7: Description géographique des stations de l'étude.....	40

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUMÉ.....	iii
ABSTRACT	iv
SIGLES, ACRONYMES, et ABREVIATIONS.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
TABLE DES MATIÈRES	viii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
1. Contexte et justification de l'étude.....	1
2. Revue de littérature.....	2
2.1 Clarification conceptuelle.....	2
2.2 Etat de connaissances	3
3. But de la recherche	4
4. Problèmes et questions de recherche	4
5. Objectifs du mémoire	5
6. Résultats attendus de l'étude et cibles	5
7. Grandes divisions du mémoire	5
CHAPITRE 1 : Données, matériels et méthodes	6
1.1 INTRODUCTION	6
1.2 MILIEU D'ETUDE	6
1.2.1 Localisation géographique du Bénin.....	6

1.2.2	Situation climatique du Bénin	7
1.2.3	Hydrographie du Bénin	9
1.2.4	Population et ses activités au Bénin	9
1.3	DONNEES UTILISEES	9
1.4	METHODES.....	10
1.4.1	Collecte des données	10
1.4.2	Contrôle de la qualité des données	10
1.4.3	Méthodes de traitement des données.....	10
1.5	CONCLUSION PARTIELLE	15
CHAPITRE 2 : Résultats et discussions		16
2.1	Distribution des probabilités d’occurrences des poches de sécheresse pour le seuil de 1mm : distribution empiriques et ajustement par les modèles de la chaine de Markov. 16	
2.2	Evolution temporelle des poches de sécheresse.	19
2.2.1	Poches de courte durée	19
2.2.2	Poches de longue durée	26
2.4	Poches de sécheresse à l’échelle régionale au Bénin	31
2.5	Discussion.....	32
2.6	Conclusion partielle	33
CONCLUSON GENERALE ET PERSPECTIVES		34
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		36
ANNEXE.....		40

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et justification de l'étude.

L'absence, la rareté, l'excès ou la mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies sont non seulement générateurs de crise climatique, économique et très souvent aussi d'instabilité sociale mais aussi contribue à la diminution des rendements agricoles menaçant ainsi la sécurité alimentaire (Boko, 1988). Les précipitations étant la variable climatique couramment enregistrée, repose sur l'alternance des épisodes secs et humides. Cette variabilité du régime pluviométrique affecte les ressources en eau, le rendement des cultures et la demande alimentaire, provoquant donc des excédents et pertes ou déficits (Biao et Alamou, 2018).

Cependant, le Bénin présente des déficits pluviométriques assez significatifs subvenue suite à la grande sécheresse des années 70 et cette situation pose le problème de la forte sensibilité des systèmes hydrologiques au forçage pluviométrique. Rappelons que l'agriculture pluviale est sensible à la fois à la durée et à la fréquence des épisodes humides et secs pendant la saison des pluies. Selon le dernier rapport de l'Analyse Globale de la Vulnérabilité et de la Sécurité Alimentaire (AGVSA) en République du Bénin publié en Août 2017 ; 47,5% de la population béninoise est en sécurité alimentaire et 42,9% vivent dans des conditions de sécurité alimentaire limitées pour plusieurs raisons dont les conditions pluviométriques défavorables aux cultures en font partie. La contribution de l'agriculture à l'économie reste fondamentale et contribue à un taux élevé au produit intérieur brute (INSAE, 2008). Ainsi les poches de sécheresse sont considérées comme étant la cause majeure de la mauvaise production agricole puisque selon Mzandawire (2013) « Le succès ou l'échec de la production agricole durant la saison des pluies dépend de la fréquence et de la longueur des poches de sécheresse ». La communauté des producteurs agro-pastoraux est la première touchée par les effets des variabilités climatiques et ils perçoivent les poches de sécheresse à leur manière et ont besoin d'information fiable sur l'occurrence des poches de sécheresse en vue de les exploiter pour les activités de préparation du sol et de plantation. Il ressort de la littérature (Lana et al., 2006, 2008a, 2008b cités par Agbozo et al., 2021) que les études des séries de poches de sécheresse pourraient aider à améliorer la connaissance des tendances temporelles et des mécanismes physiques régissant les séquences de sécheresse. Au Bénin, la plupart des études menées renseignent sur les probabilités d'apparitions des poches de sécheresse

alternés avec les épisodes humides. Cependant la variabilité spatio-temporelle des poches de sécheresse en saison humide a été moins approfondie au Bénin.

Eu égard ce constat, la présente étude intitulée « Caractérisation des poches de sécheresse en zones contrastées du Bénin » s'accorde de renseigner les acteurs et planificateurs dans la gestion des ressources en eau (secteur primaire, prévisions hydrologiques).

2. Revue de littérature

2.1 Clarification conceptuelle

Certains termes doivent être clarifiés en vue de mieux cerner le sujet.

- **Caractérisation** : c'est l'action de représenter un fait, un problème au moyen de ce qui le diffère des autres. (Wiktionnaire)
- **Changement et variabilité climatique** : En général, la variabilité climatique se réfère à la variation naturelle intra et interannuelle du climat, alors que les changements climatiques désignent une modification du climat attribuée directement ou indirectement aux activités humaines qui altèrent la composition de l'atmosphère globale. (Al Hamndou et al., 2008)
- **Sécheresse** : Elle se définit comme un déficit des disponibilités en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée et une région déterminée (Benzarti et al., 2013 cités par Ouedraogo, 2013). Il existe trois types de sécheresses selon des domaines d'applications. Il s'agit de la :
 - ✓ **sécheresse météorologique** : Réduction, mauvaise répartition, ou encore absence de pluies dans une région donnée sur une période donnée. (Sokona, et al., 2009 cités par Ouédraogo, 2013)
 - ✓ **sécheresse agronomique** : Situation où l'humidité du sol et les réserves en eau deviennent insuffisantes pour satisfaire les besoins des cultures dans une région donnée. (Sokona, et al., 2009 cités par Ouédraogo, 2013)
 - ✓ **sécheresse hydrologique** : Écart d'approvisionnement en eau de surface et en eau souterraine par rapport à une normale sur une période donnée. (Sokona, et al., 2009 cités par Ouédraogo, 2013)

- **Poche de sécheresse** : de la littérature, les poches de sécheresse sont l'équivalent de jours consécutifs avec des quantités de pluie quotidiennes inférieures à un certain seuil choisi.

En Afrique comme dans diverses parties du monde, les valeurs seuils couramment utilisées pour définir une poche de sécheresse sont de 0.8 ou 1 mm/jour. Une quantité de pluie inférieure à 1.0 mm est supposée s'évaporer directement avant toute utilisation (Seleshi et al., 2006 ; Froidurot & Diedhiou, 2017, Chaudry et al., 2001 ; Douguedroit, 1987 ; Lázaro et al., 2001 ; Epifani et al., 2004). Notre étude a donc opté pour le seuil de 1mm/jour. De plus, comme une poche de longue durée a de fortes influences sur l'agriculture et l'économie, les séries de poches de sécheresse sont généralement divisés en courtes et longues périodes de sécheresse par divers auteurs (par exemple Sivakumar, 1992 ; Bonsal et al., 1999 ; Huth et al., 2000 ; Gong et al., 2005).

- **Processus stochastique** : encore appelé processus aléatoire (calcul stochastique) ou fonction aléatoire (probabilité), il représente une évolution, discrète ou à temps continu d'une variable aléatoire.
- **Tendance** : c'est un changement graduel dans les propriétés d'une variable aléatoire. Ces variations traduisent la variabilité intrinsèque des séries hydrologiques et climatiques (Lemaitre, 2002).

2.2 Etat de connaissances

Certaines études scientifiques ont indiqué qu'en fonction de la profondeur du sol et sa capacité de rétention, les poches d'au moins 10 jours secs provoquent le stress hydrique de plusieurs cultures (Stoute et al., 2008 ; Kumar et al., 2009). Généralement, l'analyse des poches de sécheresse se fait sur la base de deux variables (le nombre annuel des périodes de poches de sécheresse NAPPs et la durée ou longueur maximale des poches de sécheresse DMPS/LMPS) (Samba et al., 2012) et plusieurs en ont fait usage dans leurs recherches.

Les caractéristiques des poches humides/sèches ont été analysées dans le monde en se concentrant sur deux aspects. Le premier est lié à la distribution spatiale et à l'évolution temporelle des poches humides/sèches. Ce fut le cas dans les travaux de Gong et al. (2004) en Chine ont trouvé une tendance positive significative dans la durée des périodes de sécheresse dans différentes régions de Chine. Schmidli et al. (2005) ont trouvé un très petit nombre de stations avec une tendance à la sécheresse statistiquement significative en Suisse. Un an plus tard, les travaux de Serra et al. (2006) ont renseigné sur la tendance des poches de sécheresse en Catalogne (Espagne). Ils ont trouvé une

tendance à la baisse pour le nombre annuel de poches de sécheresse mais une tendance à la hausse pour les maximums annuels dans les séries de poches de sécheresse. En Afrique de l'ouest, on retient pour cet aspect les travaux de Sivakumar (1992) ; Sanogo et al. (2015) ; Froidurot et al. (2017) ; Girma et al. (2020). Le deuxième aspect se concentre sur l'ajustement de la courbe de la distribution de probabilité des poches humides/sèches. On note les travaux de Ezech et al. (2016) ; Salack et al. (2016). Généralement, le comportement probabiliste des caractéristiques des périodes sèches est déterminé analytiquement en supposant une structure stochastique donnée. Le modèle couramment utilisé est celui des chaînes de Markov. Au Niger, Fodé et al. (1993) ont étudié l'occurrence des poches de sécheresse ciblant plus de dix stations pour confirmer la performance des chaînes de Markov. Biao et al. (2018) ont étudié en utilisant les chaînes de Markov les probabilités de transition entre jours humides et secs sur l'ensemble des stations synoptiques du Bénin. Ces travaux entrent dans le cadre de la prise de décision dans la gestion de l'eau au Bénin. Agbozo et al. (2021) ont par leurs travaux introduit pour la première fois au Bénin l'approche fractal pour analyser le comportement complexe et la prévisibilité des poches de sécheresse observées sur la période 1951 à 2010.

3. But de la recherche

Le but de notre étude est de mettre à la disposition de la communauté et acteurs du secteur de l'eau et de l'agriculture des connaissances actualisées sur l'évolution spatio-temporelle des poches de sécheresse dans le régime pluviométrique au Bénin.

4. Problèmes et questions de recherche

Ces différentes questions ci-dessous ont constitué le centre d'intérêt de notre recherche :

- Quelle est la probabilité d'occurrence d'une longueur donnée de poche de sécheresse au Bénin ?
- Quelle est l'évolution des poches de sécheresse dans le temps au Bénin ?
- Quelle est la zone au Bénin la plus exposée au risque d'une occurrence élevée des longueurs des poches de sécheresse selon qu'elles soient courtes ou longues ?

5. Objectifs du mémoire

Cette étude a pour objectif général de caractériser l'évolution des poches de sécheresse au sein du régime pluviométrique au Bénin. Pour parvenir à la concrétisation de cet objectif, il a été spécifiquement question :

- d'identifier les longueurs de poches de sécheresse et leur probabilité d'occurrence ;
- de déterminer la tendance temporelle de chaque longueur des poches de sécheresse ;
- de comparer l'occurrence des poches de sécheresse entre les zones climatiques.

6. Résultats attendus de l'étude et cibles

Les résultats attendus à la suite de cette étude se résument en une meilleure connaissance sur la récente évolution spatio-temporelle des poches de sécheresse au Bénin.

7. Grandes divisions du mémoire

Notre travail s'organise en deux chapitres (hors introduction et conclusion générale). L'introduction générale présente le sujet du mémoire. Le premier chapitre traite des informations relatives au milieu d'étude, aux données utilisées ainsi qu'à la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs de l'étude. Le second chapitre présente les résultats et la discussion. La conclusion générale présente la synthèse des différents résultats obtenus.

CHAPITRE 1 : Données, matériels et méthodes

1.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente le cadre d'étude en général, sa localisation, climat, sol, hydrographie, ainsi que les activités économiques effectuées. Les informations liées aux données utilisées et techniques de traitement pour cette étude ont été également décrites dans ce chapitre.

1.2 MILIEU D'ETUDE

1.2.1 Localisation géographique du Bénin

Le Bénin est situé en Afrique de l'Ouest dans la zone tropicale entre l'équateur et le tropique du Cancer (entre les parallèles 6°30' et 12°30' de latitude Nord et les méridien 1° et 3°40' de longitude Est), voir **Figure 1**. Il est limité au nord par le fleuve Niger qui le sépare de la République du Niger, au nord-ouest par le Burkina Faso, le Togo et le Nigeria le limite à l'ouest et à l'est respectivement et au Sud par l'Océan Atlantique. Le Bénin couvre une superficie de 114 763 Km² et s'étend sur 700 Km, du fleuve Niger (au nord) à la côte atlantique (au sud) ; la largeur varie de 125 Km (le long de la côte) à 325 Km (à la latitude Tanguiéta-Ségbana), (Adam,2008).

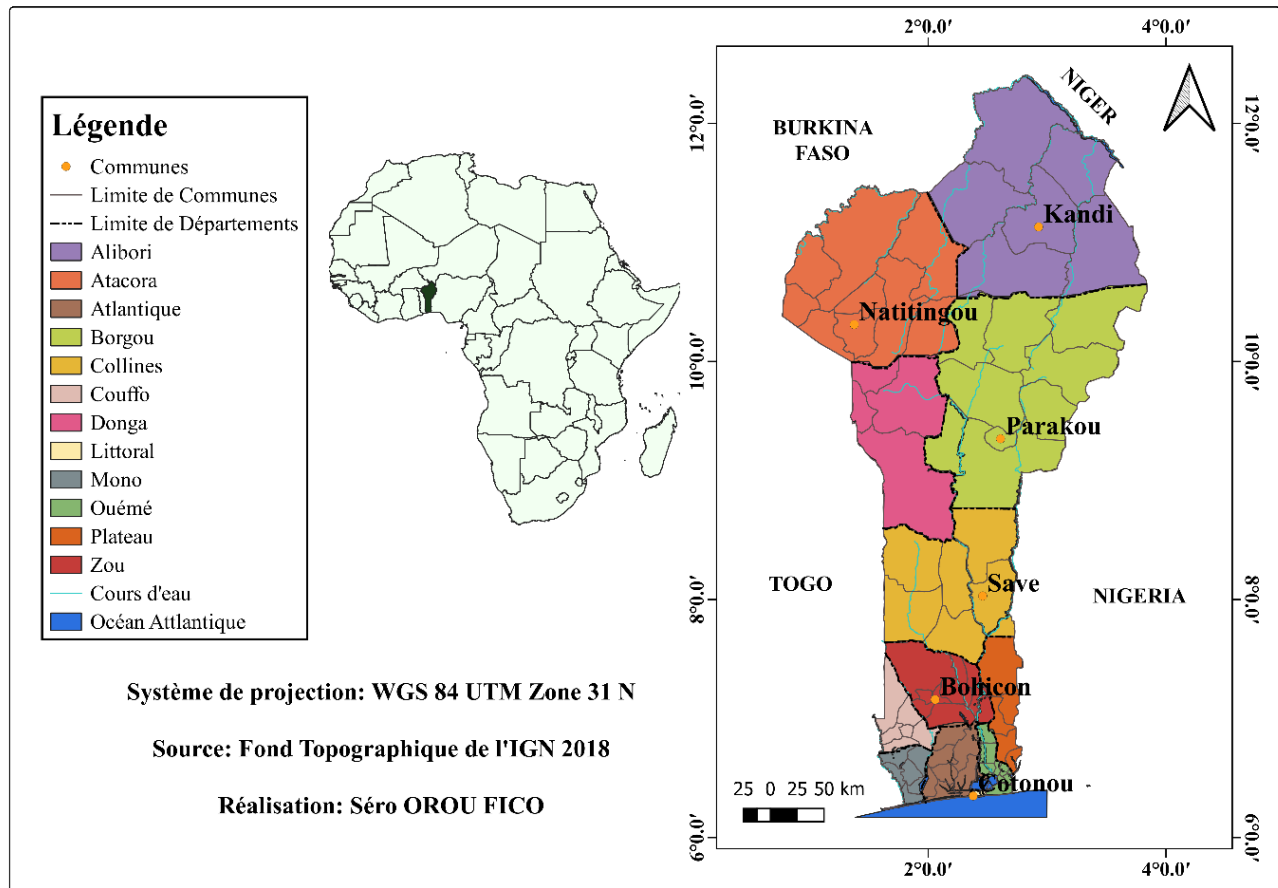


Figure 1: Situation géographique du Bénin

1.2.2 Situation climatique du Bénin

La zone d'étude couvre au totale 42 stations (synoptiques et météorologiques) de la République du Bénin dont les localisations géographiques sont indiquées dans le **Tableau 7**.

Comme le montre la **Figure 2**, le climat béninois est divisé en deux grandes zones climatiques qui ont un régime pluviométrique spécifique : le climat soudanien au-dessus de la latitude 8°30' et celui subéquatoriale en dessous de la latitude 7°. Entre ces deux types de climat, il existe une zone de transition où, selon les années, le régime pluviométrique est bimodal comme au sud ou monomodal comme au nord du pays, avec une pluviométrie moyenne annuelle variant entre 1000 et 1200 mm (Oyédé et al., 2022). Selon Boko (1988), la zone climatique soudanienne est caractérisée par la succession dans l'année d'une seule saison sèche (novembre à mars) et d'une saison des pluies avec des précipitations maximales en août et septembre. Alors que le climat subéquatorial est caractérisé par un régime pluviométrique bimodal. Il y a quatre saisons plus ou

moins marquées : deux saisons des pluies (mi-avril à juillet et mi-septembre à mi-novembre) et deux saisons sèches (août à mi-septembre et novembre à mars). Les maximas pluviométriques ont généralement lieu en juin pour la grande saison des pluies et en octobre pour la petite saison des pluies.

Notons que la zone de transition au nord de la latitude 7°60', sera annexée au régime unimodal, dans la mesure où l'occurrence d'une saison pluvieuse y est plus forte.

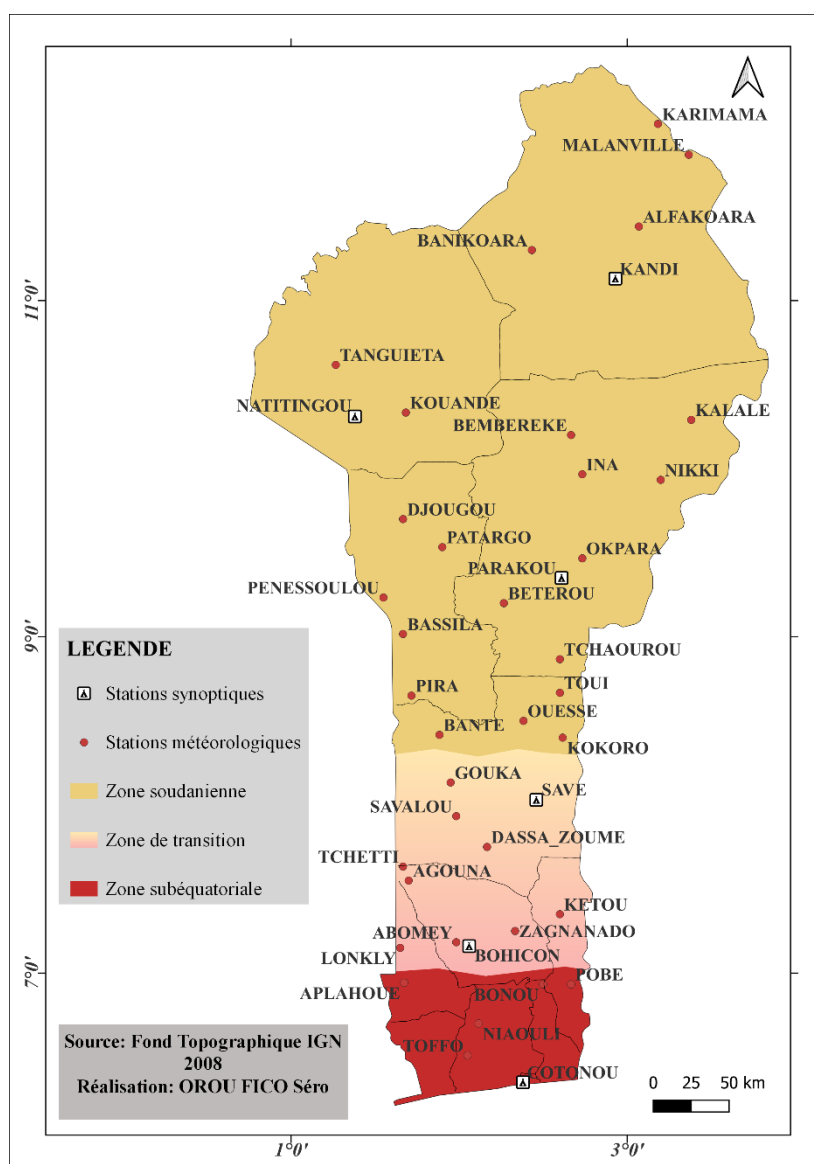


Figure 2: Zones climatiques du Bénin

1.2.3 Hydrographie du Bénin

Plusieurs cours d'eau traversent le pays à savoir le Mékrou (410 Km), l'Alibori (338 Km), la Sota (250 Km) et la Pendjari (350 Km), lesquels définissent le bassin du Niger. Aussi s'ajoute-t-il le bassin côtier dont les fleuves rejoignent l'Océan. Il s'agit des fleuves de l'Ouémé (510 Km), le Couffo (190 Km) et le Mono (350 Km).

Le Sud-Bénin est parcouru par des plans d'eau, soit le lac Nokoué (138 Km²), le lac Ahémé (78 Km²), le lac Toho et les lagunes de Porto-Novo, (Adam et al,1993).

1.2.4 Population et ses activités au Bénin

La population est estimée à 12 506 347 d'habitants en 2021 et estimée à 12 953 540 fin 2022. Le sud est ainsi très peuplé, la densité y varie entre 192 et 322 hab./km², tandis que la densité fluctue dans le nord du pays entre 16 et 21 hab./km². Le taux moyen de la croissance démographique est de 2,8% par an. L'agriculture est la base de l'économie béninoise. Elle occupe 62% de la population active, contribue pour 41 % au produit intérieur brut et constitue 80% des recettes d'exportation. Ainsi les terres cultivables sont estimées à 70 500 km² sur la superficie totale, soit 63% d'occupation. Notons que le Bénin est un pays producteur du coton. La majorité de la population exerce l'agriculture (moins au Sud-Bénin), l'élevage et la pêche (moins au Nord-Bénin) comme activités principales qui nécessitent beaucoup d'eau. Les produits cultivés sont le riz, le maïs, le mil, le haricot, le sorgho, le fonio, l'igname, la pomme de terre, le manioc, ... (PNUD, 2005)

1.3 DONNEES UTILISEES

Les données pluviométriques journalières utilisées pour cette étude sont collectées à partir des six stations synoptiques du Bénin et ont été fournies par « Météo-Bénin », le service météorologique en charge des données climatiques au Bénin. Pour la présente étude a pris en considération les données pluviométriques enregistrées durant les saisons pluvieuses. La période d'étude varie d'une station à une autre, elle s'étend de l'année de création de chacune d'elle à 2021.

1.4 METHODES

1.4.1 Collecte des données

Elle intègre d'abord la recherche des documents scientifiques généraux et spécifiques et autres documents ayant permis de mieux cerner les aspects du sujet. Ensuite, nous avons la collecte des données pluviométriques journalières pour chacune des 06 stations synoptiques et 36 stations météorologiques du Bénin (*Tableau 7*).

1.4.2 Contrôle de la qualité des données

Comme pour tout type d'analyse statistique, la pertinence des résultats dépend en premier lieu de la qualité des données disponibles. Les données pluviométriques ont été minutieusement traitées (Elimination des années avec beaucoup de lacune) en vue de constituer une série chronologique complète et fiable, exempte de toutes les valeurs aberrantes.

1.4.3 Méthodes de traitement des données

1.4.3.1 Poches de Sécheresse

Au regard des divergences qu'il y a entre la sécheresse et les poches de sécheresse et selon le contexte du présent travail, la sécheresse météorologique convient mieux à l'étude. En effet, la réduction des précipitations se ressent au niveau du milieu naturel.

Considérant une période de saison pluvieuse, les poches de sécheresse ont été déterminé suivant leur longueur (nombre de jours consécutifs secs au seuil de 1 mm de précipitation journalière) et leur occurrence a pris en compte le nombre annuel d'apparition spécifique à chaque longueur (variable étudiée). Cependant, les poches de courte durée (poches de CD) sont définies comme les événements d'une durée inférieure à 10 jours tandis que les poches de longue durée (poches de LD) se réfèrent aux autres (Agbozo et al., 2021). Dans cet article, la même division est faite sur les séries chronologiques des durées (ou longueurs) de poches de sècheresse.

1.4.3.2 Modélisation par les chaines de Markov

La méthode par les chaînes de Markov a été appliquée pour déterminer la persistance de la sécheresse à l'échelle journalière. En effet étant donnée une journée quelconque donnée sèche ou non et précédée par une journée sèche ou pas, on peut se demander quelle est la probabilité d'avoir une journée sèche la journée suivante ou encore une journée humide.

Le processus exprime des probabilités conditionnelles de passage de l'état de la veille à l'état de la journée en cours. Ainsi l'état de la journée t ne dépend que de l'état $t-1$ pour le processus de Markov d'ordre 1. Éventuellement, il dépendra des états $t-1$ et $t-2$ pour le processus de Markov d'ordre 2 et la même logique est suivie pour les ordres supérieurs.

La justification de l'utilisation de la chaîne de Markov dans ce cas s'explique par le fait que les rétroactions du système terre-atmosphère permettent d'admettre que chaque nouvelle réalisation d'un événement au temps t dépend des réalisations antérieures (Afouda et al., 1997). C'est donc un outil statistique parmi tant d'autres qui permet de calculer la probabilité d'occurrence d'un événement à un instant donné, sachant qu'il s'est produit l'instant avant. La détermination des probabilités d'avènement amène à considérer les précipitations comme des processus stochastiques survenant de manière aléatoire (Fodé et al., 1993). L'établissement d'un modèle statistique est nécessaire pour l'application des chaînes de Markov se définit selon les relations suivantes :

Selon Fodé et al. (1993) repris par Ouédraogo (2013),

- Considérons une séquence de n jours consécutifs : Soit x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) une série n variables aléatoires prenant les valeurs $x_i = d$ (dry "d" = sec) et $x_i = w$ (wet "w" = humide). Ainsi par exemple $x_2 = d$ signifie que le second jour de la séquence est sec et $x_5 = w$ signifie que le 5^e jour est humide.
- Soit la probabilité $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ que la séquence $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ se réalise c'est-à-dire que $P(x_1)$ est la probabilité que l'évènement du jour $n-1$ de la séquence se produise et ainsi de suite jusqu'à l'ordre n .

L'application de la propriété de Markov à l'ordre 2 conduit à l'écriture suivante :

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(x_1) \times P(x_2/x_1) \times P(x_3/x_2, x_1) \times \dots \times P(x_n/x_{n-2}, x_{n-1})$$

Cette équation permet de calculer les différentes probabilités de combinaisons contenues dans la séquence. Ainsi pour déterminer l'état (pluvieux ou sec) d'un jour donné l'on se réfèrera sur l'état des deux jours précédents. À l'ordre 3, logiquement l'état des trois jours précédents permettront de prévoir l'état du jour dont il s'agit.

La chaîne de Markov du 2nd ordre nécessitera la détermination du nombre de séquences sèches de longueur supérieure ou égale à deux jours. Comme annoncé plus haut une séquence sèche est

d'office un temps sans précipitation ou encore avec précipitation n'atteignant pas le seuil fixé pour l'étude. La notation sera adoptée dans le reste du raisonnement de l'étude :

➤ (w_d) définie un jour sec précédé d'un jour pluvieux et sa probabilité sera noté P_{wd}

Ainsi l'expression de la probabilité d'obtenir deux jours secs encadrés de pluies est la suivante :

$$q_2 = P_{wdwd} = P(d/dw) \times P(w/dd)$$

Les probabilités d'avoir 3 jours et 4 jours secs encadrés de pluies sont respectivement q_3 et q_4 et sont données par les expressions suivantes :

$$q_3 = P_{wdddw} = P(d/dw) \times P(d/dd) \times P(w/dd) = P_{wdd} \times P_{ddd} \times P_{ddw}$$

$$q_4 = P_{wddddw} = P(d/dw) \times P(d/dd) \times P(d/dd) \times P(w/dd) = P_{wdd} \times (P_{ddd})^2 \times P_{ddw}$$

Lorsqu'on généralise, en considérant pour n jours secs, on obtient :

$P(d/dw) = P_{wdd}$ la probabilité d'avoir un jour sec sachant que la veille c'était sec et l'avant-veille humide. Comme il s'agit de probabilité conditionnelle sera l'évènement complémentaire serait donc avoir un jour pluvieux avec le même état initial à savoir jour sec précédé de jour pluvieux. En d'autres termes les évènements « avoir deux jours secs après un jour pluvieux » et « avoir un jour sec encadré de deux pluies » sont des évènements complémentaires, la somme de leur probabilité vaut 1. Ainsi $P_{wdd} = 1 - P_{wdw}$

$P(d/dd) = P_{ddd}$ la probabilité d'avoir un jour sec après deux jours secs et puisque selon les chaînes de Markov d'ordre 2, l'état d'un jour donné ne dépend que ceux des deux jours précédents, les évènements(ddd) et ($wddd$) sont équivalents donc $P_{ddd} = P_{wddd}$. Mais ($wddd$) est l'évènement complémentaire de ($wddw$). Donc $P_{wddd} = 1 - P_{wddw}$

$P(w/dd) = P_{ddw}$ la probabilité d'avoir un jour pluvieux sachant que les deux jours d'avant étaient secs. Parce que selon la même logique des chaînes de Markov à l'ordre 2, l'état d'un jour donné ne dépend que de ceux des deux jours précédents, $P_{ddw} = P_{wddw}$.

En conclusion, pour les chaînes de Markov du 2ème ordre, la probabilité qu'une séquence sèche dure n jour est donnée par la relation :

$$q_n = (1 - P_{wdw}) (1 - P_{wddw})^{n-2} (P_{wddw})$$

Pour les chaînes de Markov à l'ordre 3 :

$$q_n = (1 - P_{wdw}) (1 - P_{wddw})^{n-2} (P_{wdddw})$$

Cependant, les différentes probabilités contenues dans l'expression des chaînes de Markov du second et du 3^e ordre sont calculées de manières empiriques :

$$P_{wdw} = \frac{\text{Nombre de séquences } wdw}{\text{Nombre de séquence } wd \dots} \quad (1)$$

$$P_{wddw} = \frac{\text{Nombre de séquences } wddw}{\text{Nombre de séquence } wdd \dots} \quad (2)$$

$$P_{wdddw} = \frac{\text{Nombre de séquences } wdddw}{\text{Nombre de séquence } wddd \dots} \quad (3)$$

Pour le calcul des probabilités empiriques, la formule ci-dessous a été établit :

$$q_n = \frac{\text{Nombre de séquences de } n \text{ jours secs}}{\sum_{m=1}^{30} \text{Nombre de séquences } w \underbrace{d \dots d}_{m \text{ fois}} w} \quad (4)$$

1.4.3.3 Test de Mann-Kendall (MK) modifié pour la tendance (Hamed et al. 1998)

Le test MK non paramétrique (Mann, 1945 ; Kendall, 1975) est probablement le test non paramétrique largement utilisé pour la détection des tendances dans les études hydrologiques (Kundzewicz et al., 2000, Xiong et al., 2004 ; Hamed 2008 ; Fiala et al. 2010). La statistique du test MK est calculée par :

$$S = \sum_{h=1}^{n-1} \sum_{j=h+1}^n [\text{sgn}(X_j) - X_h] \quad (5)$$

Où X_j désigne les valeurs de données ordonnées, n est la longueur des observations et Sign est la fonction de signe donnée par :

$$\text{Sign}(X_j - X_h) = \begin{cases} 1 & \text{si } X_j - X_h > 0 \\ 0 & \text{si } X_j - X_h = 0 \\ -1 & \text{si } X_j - X_h < 0 \end{cases} \quad (6)$$

La variance de la statistique peut être calculée par :

$$E(S) = 0$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{h=1}^m t_h h(h-1)(2h+5)}{18} \quad (7)$$

Où $E(S)$ est la moyenne et t est le nombre de limites jusqu'à l'étendue h . La statistique normalisée Z_s (Tau) pour le test MK est donnée par :

$$Z_s = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } (S > 0) \\ 0 & \text{si } (S = 0) \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } (S < 0) \end{cases} \quad (8)$$

Une valeur positive du Z_s , indique que la direction de la tendance pour un seuil de significativité précis, est à la hausse et une valeur négative qu'elle est à la baisse.

Hamed et al. (1998) ont proposé une version modifiée du test MK original dans laquelle la variance de la statistique du test MK original est modifiée pour tenir compte de l'autocorrélation dans la série chronologique. Ils ont développé une équation empirique pour le calcul du nombre d'effectif d'observations en tenant compte de l'autocorrélation dans les données (ns^*). Yue et al. (2004) ont évalué le nombre effectif d'échantillons proposés pour modifier la statistique MK à l'aide de la simulation de Monte Carlo. Ils ont démontré que ns^* limite efficacement les effets de la corrélation sérielle sur le test MK lorsqu'il est calculé sur la base de la corrélation sérielle d'échantillons estimée à partir de séries sans tendance. La statistique pour l'ajustement de la variance est donnée par :

$$\text{Var}(S) = \frac{n}{18 ns^*} (n(n-1)(2n+5)) \quad (9)$$

$$\text{avec } \frac{n}{ns^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{f=1}^p (n-f)(n-f-1)(n-f-2)p_e(f)$$

Le paramètre $\rho_e(f)$ symbolise l'autocorrélation entre les rangs des observations pour le décalage f et p est le décalage temporel maximal considéré (Sinha et al., 2008).

Cette version modifiée du test MK, a été approuvée par la communauté hydro-climatologique (Khaliq, 2009), et donc utilisée dans notre étude. Le seuil de significativité considéré pour cette étude est 5%.

1.4.3.4 Interpolation par l'IDW pour la répartition régionale des poches de sécheresse

La pondération inverse de la distance (IDW en anglais) est une méthode d'interpolation largement utilisée et facile à mettre en œuvre. Son idée générale repose sur l'hypothèse que la valeur d'attribut d'un point non échantillonné est la moyenne pondérée des valeurs connues dans le voisinage (Shepard, 1968). Ainsi, soient $Z(x_i)$ les valeurs connues pour les probabilités d'occurrence des poches de sécheresse (dans le cadre de notre étude) aux emplacements x_i (les stations synoptiques) et $Z(x_0)$ la valeur inconnue que l'on désire estimer à l'emplacement x_0 . Les formules de l'IDW sont données par les équations :

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N w_{i0} Z(x_i) \quad (10)$$

$$\text{avec } w_{i0} = \frac{d_{0i}^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^N d_{0i}^{-\alpha}}, \quad \alpha = 1$$

Dans ces équations, N est le nombre de poste pluviométrique pris en compte (six en tout dans le cadre de notre étude). d_{0i} représente la distance entre chaque poste (x_i) et l'emplacement (x_0).

1.5 Conclusion partielle

Le présent chapitre nous a permis d'avoir une connaissance approfondie sur la localisation, le relief, la végétation, le climat et l'hydrographie de notre zone d'étude. Aussi, à travers ce chapitre, une méthodologie a été élaborée et sa mise en application permettra de mettre en évidence l'évolution des poches de sécheresse suivant leurs longueurs sur la zone d'étude.

CHAPITRE 2 : Résultats et discussions

Le présent chapitre montre les résultats du traitement et de l'analyse des données suivant l'application de la méthodologie énoncée dans le chapitre précédent. Ainsi les chaînes de Markov ont été utilisées pour obtenir un ajustement de la distribution empirique des probabilités d'occurrence des différentes longueurs de poches de sécheresse enregistrées. Les résultats statistiques du test de Mann-Kendall modifiés renseignent sur l'évolution temporelle de chacune des caractéristiques des poches de sécheresse. Enfin la comparaison à l'échelle spatiale a permis d'apprécier l'étendue des poches de sécheresse suivant la méthode d'interpolation de l'IDW.

2.1 Distribution des probabilités d'occurrences des poches de sécheresse pour le seuil de 1mm : distribution empiriques et ajustement par les modèles de la chaîne de Markov.

Les stations synoptiques ont été prises en compte pour représenter chaque zone climatique en raison de la qualité des données.

➤ Climat soudanien

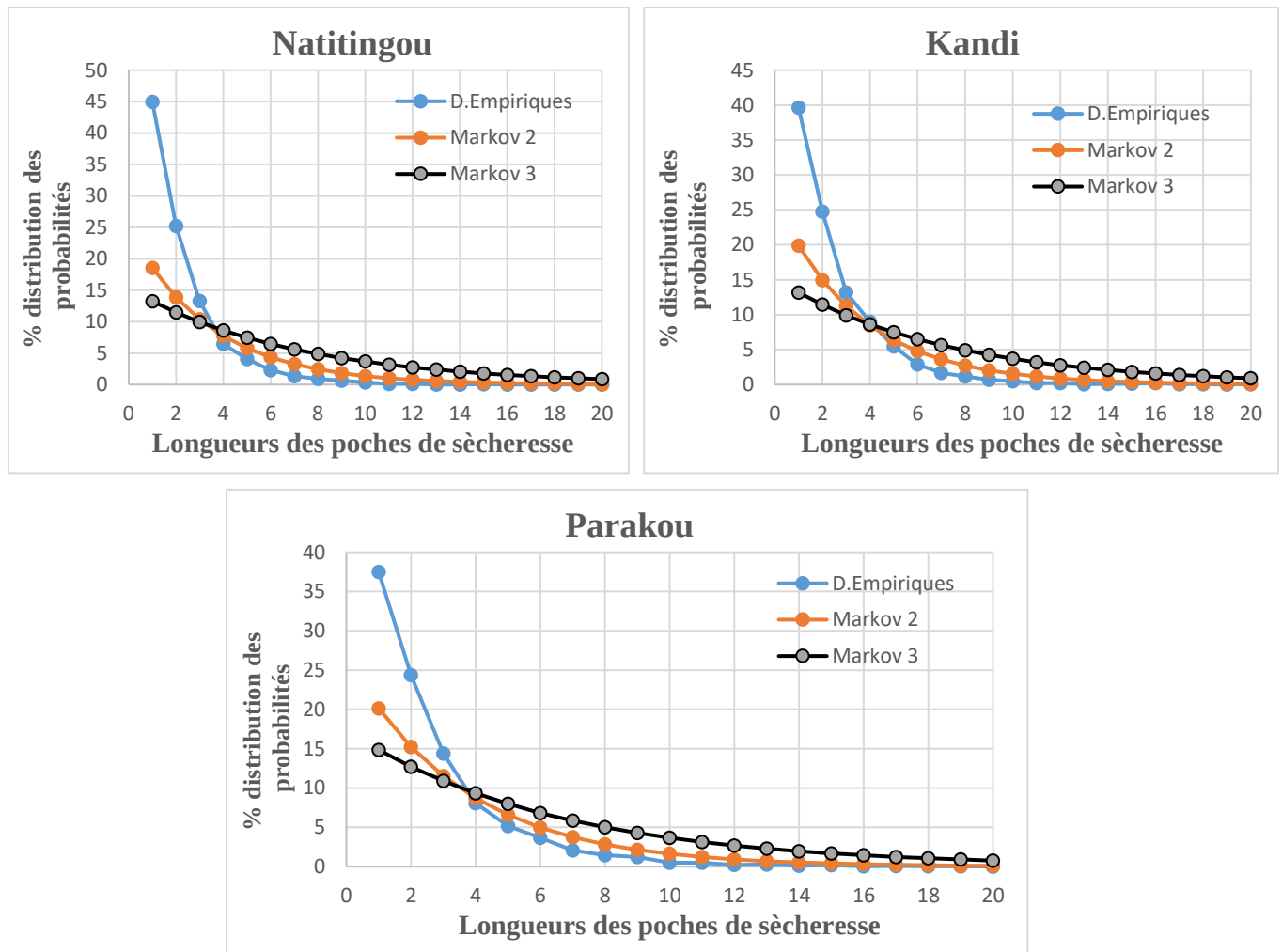


Figure 3: Distribution empiriques des probabilités d'occurrence et par les ajustements des chaînes de Markov pour le climat soudanien.

➤ Climat de transition

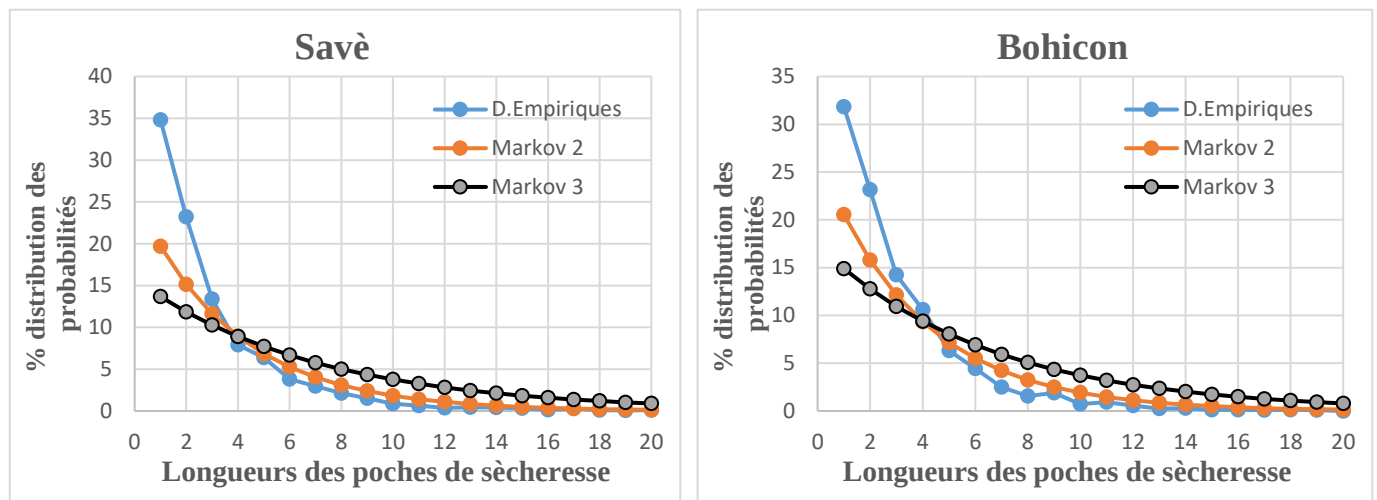


Figure 4: Distribution empiriques des probabilités d'occurrence et par les ajustements des chaînes de Markov pour le climat de transition.

➤ Climat subéquatorial

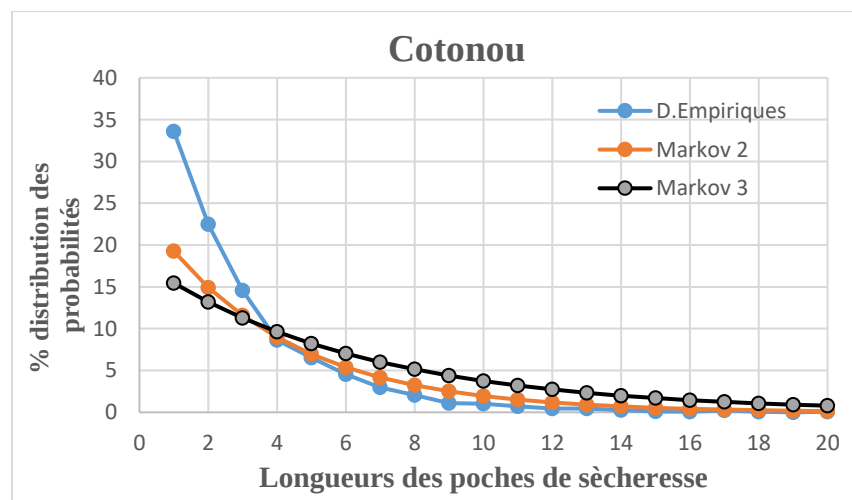


Figure 5: Distribution empiriques des probabilités d'occurrence et par les ajustements des chaînes de Markov pour le climat subéquatorial.

L'ensemble des **Figure 3** à **5** montrent la distribution empirique des probabilités d'occurrence des différentes longueurs de poches de sécheresse et les ajustements par les chaînes de Markov pour chaque station synoptique.

L'analyse des différentes figures montrent que les plus grandes probabilités d'occurrence (empiriques) sont pour les poches de longueurs de 1 jours. Au fur et à mesure qu'on augmente en longueur, et surtout au-delà de 10 jours (poches de LD), les probabilités tendent vers 0%. L'ajustement par les chaînes de Markov d'ordre 3 a surestimé les chances d'occurrence des poches de sécheresse de longues durées. Le constat est nettement visible pour les stations de la zone climatique tropicale. Cependant la courbe des probabilités données par la chaîne de Markov d'ordre 2 est celle qui s'approche le mieux de l'allure de la distribution empiriques des probabilités d'occurrence des poches de sécheresse suivant chaque longueur sèche. Ce constat est le même pour toutes les stations synoptiques, et on peut en déduire pareil pour toutes les stations de l'étude.

2.2 Evolution temporelle des poches de sécheresse.

Les tableaux de cette section montre les résultats du test de Mann-Kendall modifié pour la tendance au seuil de significativité de 5% de l'occurrence des poches de sécheresse suivant la classification des durées. Les stations à tendance significative ont été illustré.

2.2.1 Poches de courte durée

➤ Régime unimodal

Tableau 1: Tendances des poches de courte durée pour le régime unimodal.

	Stations	p-Value	U (tau de Kenadall	Tendance au seuil de 5%	Sens de la tendance
ZONE SOUDANIE	Alfakoara	5.37.E-01	-2.30.E-02	Non signif	Négatif
	Banikoara	3.11.E-01	6.02.E-02	Non signif	positif
	Bantè	3.92.E-04	-1.48.E-01	Signif	Négatif
	Bassila	1.68.E-23	-3.18.E-01	Signif	Négatif
	Bembèrèkè	7.49.E-01	-1.66.E-02	Non signif	Négatif
	Bétèrou	1.01.E-01	-9.11.E-02	Non signif	Négatif
	Djougou	3.14.E-05	7.55.E-02	Signif	positif
	Ina	1.91.E-01	-5.93.E-02	Non signif	Négatif
	Kalalé	3.55.E-03	-1.07.E-01	Signif	Négatif
	Kandi	1.13.E-02	6.53.E-02	Signif	positif
	Karimama	9.26.E-05	2.17.E-01	Signif	positif

	Kokoro	8.03.E-01	1.13.E-02	Non signif	positif
	Kouandé	2.55.E-27	2.41.E-01	Signif	positif
	Malanville	1.03.E-01	5.00.E-02	Non signif	positif
	Natitingou	3.25.E-01	2.26.E-02	Non signif	positif
	Nikki	2.31.E-02	5.92.E-02	Signif	positif
	Okpara	3.44.E-07	-1.45.E-01	Signif	Négatif
	Ouessè	3.83.E-02	-7.99.E-02	Signif	Négatif
	Parakou	7.53.E-20	2.54.E-01	Signif	positif
	Patargo	3.07.E-01	-9.09.E-02	Non signif	Négatif
	Pénéssoulou	7.17.E-01	-3.66.E-02	Non signif	Négatif
	Pira	6.24.E-04	-2.55.E-01	Signif	Négatif
	Tanguiéta	6.74.E-01	1.37.E-02	Non signif	positif
	Tchaourou	4.24.E-03	-1.38.E-01	Signif	Négatif
	Toui	8.71.E-01	-9.80.E-03	Non signif	Négatif
ZONE de TRANSITION	Dassa-Zoumé	2.58.E-01	-7.08.E-02	Non signif	Négatif
	Gouka	2.08.E-08	-2.84.E-01	Signif	Négatif
	Savalou	7.23.E-01	-1.48.E-02	Non signif	Négatif
	Savè	2.75.E-02	8.00.E-02	Signif	positif
	Tchetti	2.80.E-05	-1.96.E-01	Signif	Négatif

Les résultats de ce tableau montrent que sur les 13 stations de la zone soudanienne dont la tendance est significative, les tendances significatives positives sont obtenues à Djougou, Kandi, Karimama, Kouandé, Nikki et Parakou. Les stations de Bantè, Bassila, Kalalé, Okpara, Ouessè, Pira et Tchaourou ont des tendances négatives significatives au seuil de 5%. De plus pour la zone de transition à régime unimodal, les tendances sont significatives et négatives à Gouka et Tchetti mais positives à Savè.

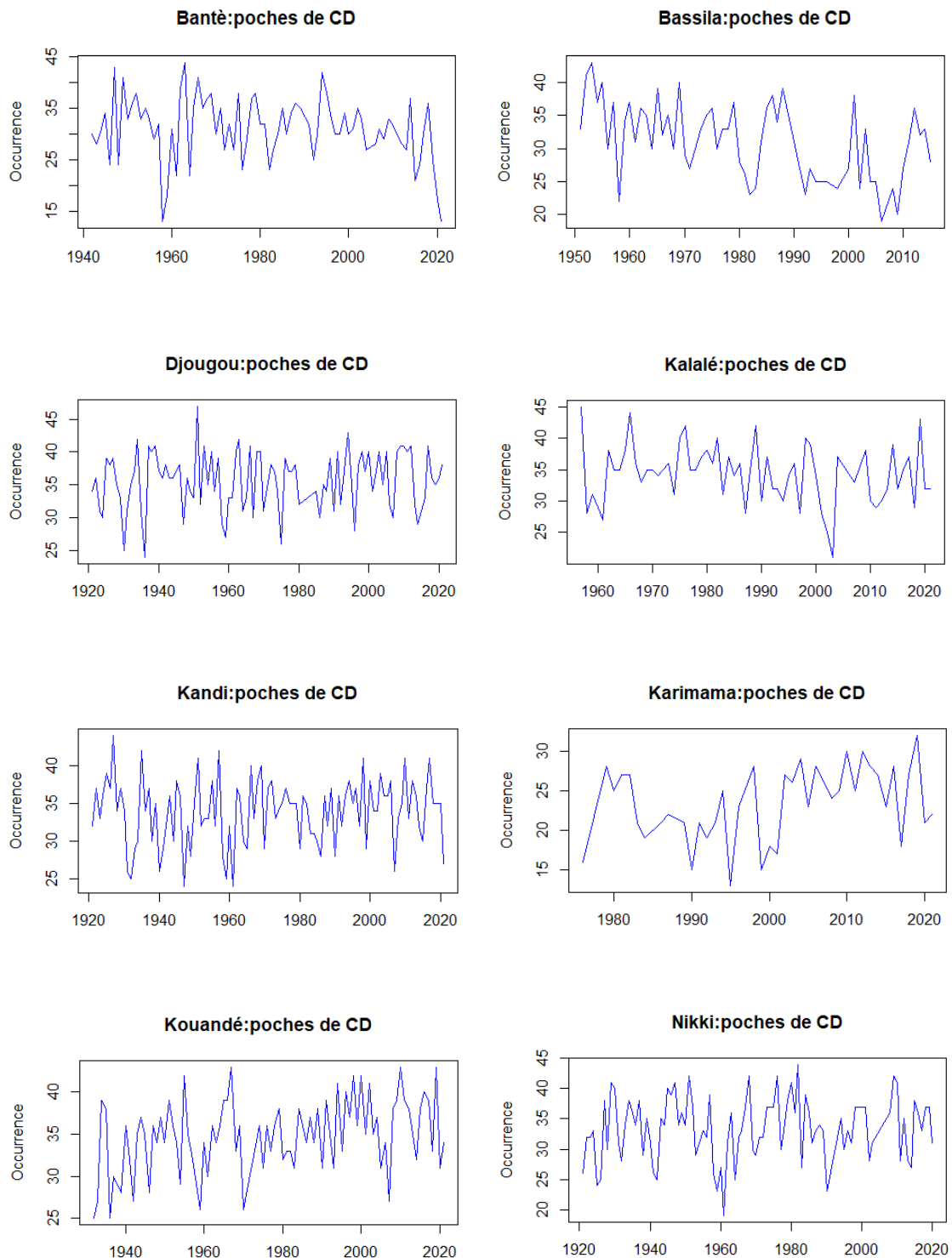


Figure 6: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de courte durée en régime unimodal.

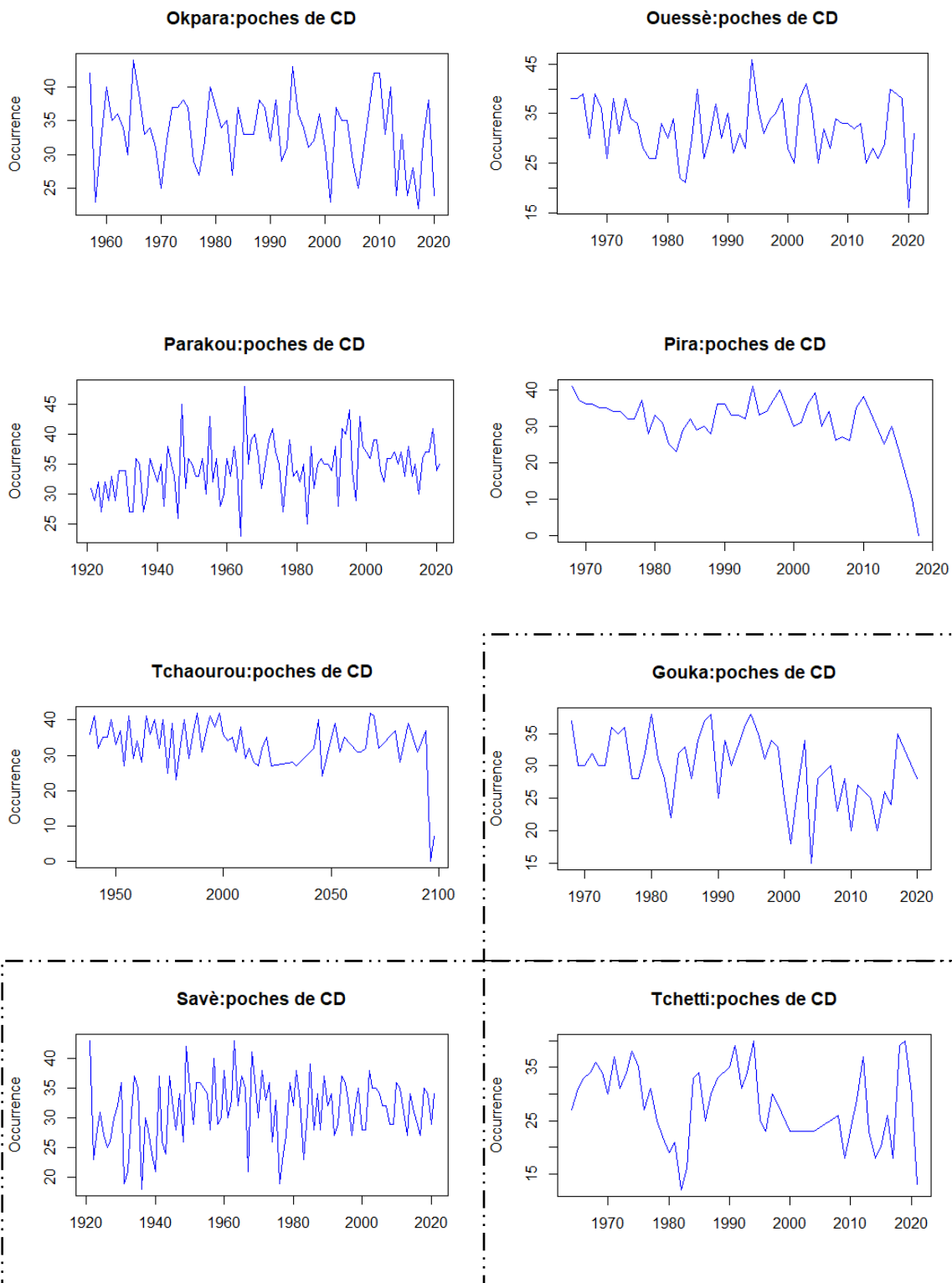


Figure 7: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de courte durée en régime unimodal. (suite)

En somme, sur l'évolution temporelle des poches de sécheresse de courtes durées durant les saisons pluvieuses du régime unimodal au Bénin, on peut conclure que l'occurrence est majoritairement croissante dans la zone soudanienne et décroît au fur et à mesure qu'on approche la zone de transition.

➤ Régime bimodal

Tableau 2: Tendances des poches de courte durée pour le régime bimodal (grande saison de pluies).

Grande Saison	Stations	p-Value	U (tau de Kenadall)	Tendance au seuil de 5%	Sens de la tendance
ZONE DE TRANSITION	Abomey	2.45.E-01	7.73.E-02	Non signif	Positif
	Agouna	4.96.E-02	-7.14.E-02	Signif	Négatif
	Bohicon	2.42.E-01	-6.02.E-02	Non signif	Négatif
	Kétou	6.00.E-02	-1.23.E-01	Non signif	Négatif
	Lonkly	1.22.E-04	-1.14.E-01	Signif	Négatif
	Zagnanado	5.09.E-01	3.22.E-02	Non signif	Positif
ZONE SUB-EQUATORIALE	Aplahoué	3.94.E-03	-1.32.E-01	Signif	Négatif
	Bonou	4.31.E-20	-2.98.E-01	Signif	Négatif
	Cotonou	6.98.E-02	-9.72.E-02	Non signif	Négatif
	Niaouli	8.34.E-08	-1.82.E-01	Signif	Négatif
	Pobè	8.26.E-01	7.57.E-03	Non signif	Positif
	Toffo	1.50.E-03	-8.11.E-02	Signif	Négatif

Les résultats du tableau ci-dessus montrent que pour le régime bimodal pendant la grande saison des pluies, toutes les tendances significatives obtenues sont négatives. Il s'agit des stations d'Agouna et Lonkly pour la zone de transition ; d'Aplahoué, Bonou, Niaouli et Toffo pour la zone subéquatoriale.

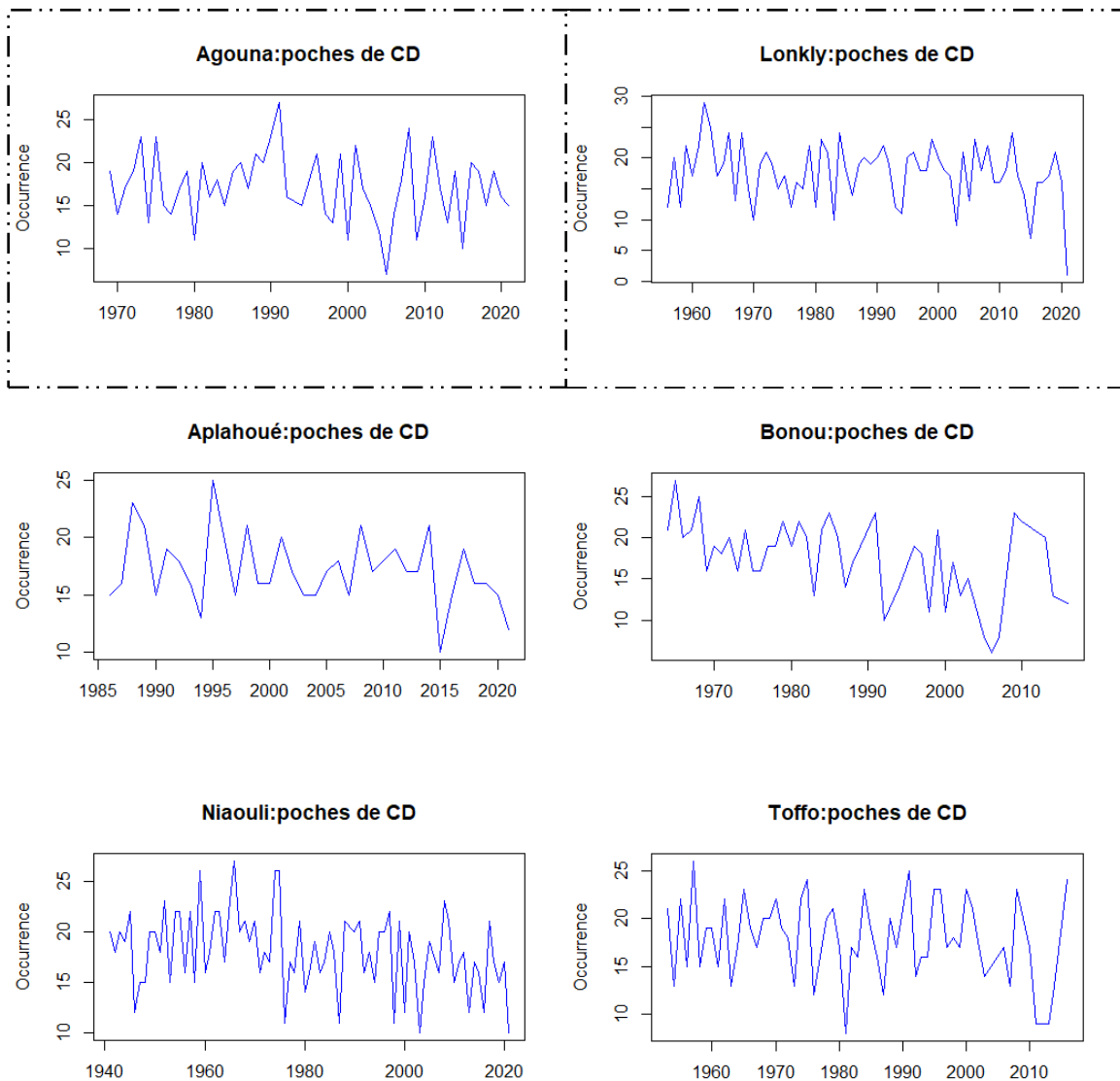


Figure 8: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de courte durée en régime bimodal (grande saison des pluies).

De cette analyse, on retient donc que durant les grandes saisons de pluies, le régime bimodal au Bénin enregistre au fil du temps une occurrence décroissante des poches de courtes durées.

Tableau 3: Tendances des poches de courte durée pour le régime bimodal (petite saison de pluies).

Petite saison	Stations	p-Value	U (tau de Kenadall	Tendance au seuil de 5%	Sens de la tendance
ZONE DE TRANSITION	Abomey	1.97.E-01	3.78.E-02	Non signif	Positif
	Agouna	1.59.E-01	9.04.E-02	Non signif	Positif
	Bohicon	8.34.E-01	-1.02.E-02	Non signif	Négatif
	Kétou	3.14.E-03	-1.09.E-01	Signif	Négatif
	Lonkly	9.99.E-06	-1.76.E-01	Signif	Négatif
	Zagnanado	2.79.E-01	-3.05.E-02	Non signif	Négatif
ZONE SUB-EQUATORIALE	Aplahoué	2.20.E-01	5.11.E-02	Non signif	Positif
	Bonou	8.80.E-01	-4.25.E-03	Non signif	Négatif
	Cotonou	9.24.E-01	4.97.E-03	Non signif	Positif
	Niaouli	6.22.E-04	-1.35.E-01	Signif	Négatif
	Pobè	5.70.E-02	-6.34.E-02	Non signif	Négatif
	Toffo	2.56.E-05	1.97.E-01	Signif	Positif

Les différents résultats obtenus du tableau ci -dessus renseignent que pendant la petite saison des pluies du régime bimodal, les stations de Kétou et Lonkly (zone de transition) présentent des tendances significatives négatives. Dans la zone subéquatoriale, les tendances sont significatives à Niaouli (négative) et Toffo (positive).

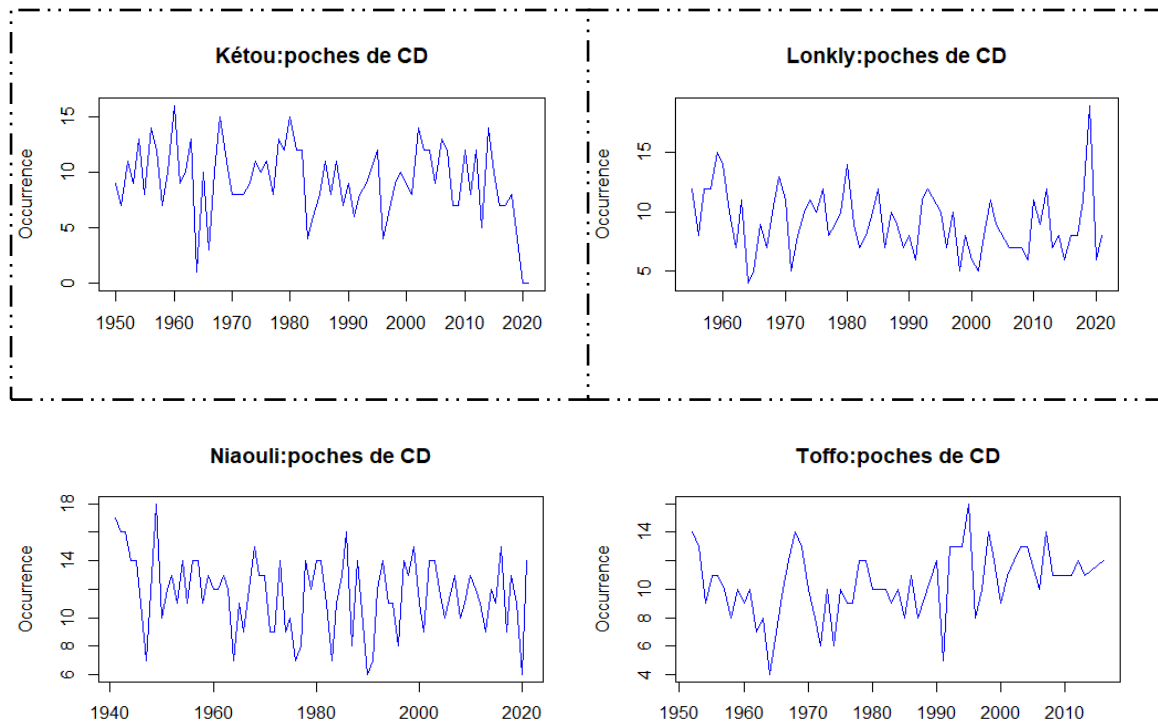


Figure 9: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de courte durée en régime bimodal (petite saison de pluies).

Cette analyse permet de comprendre que pour la petite saison de pluies du régime bimodal au Bénin, l'occurrence dans le temps de poches de courte durée est majoritairement croissante dans la partie sud du pays et décroît en approchant la zone de transition.

2.2.2 Poches de longue durée

➤ Régime unimodal

Tableau 4: Tendances des poches de longue durée pour le régime unimodal.

	Stations	p-Value	U (tau de Kenadall	Tendance au seuil de 5%	Sens de la tendance
ZONE SOUDANIENNE	Alfakoara	5.22.E-02	8.84.E-02	Non signif	Positif
	Banikoara	9.42.E-02	6.06.E-02	Non signif	Positif
	Bantè	4.86.E-01	2.94.E-02	Non signif	Positif
	Bassila	1.88.E-02	2.80.E-01	Signif	Positif
	Bembèrèkè	7.29.E-02	5.09.E-02	Non signif	Positif
	Beterou	1.08.E-01	1.03.E-01	Non signif	Positif
	Djougou	1.62.E-01	-6.61.E-02	Non signif	Négatif
	Ina	6.90.E-01	-1.58.E-02	Non signif	Négatif
	Kalalé	4.07.E-02	1.49.E-01	Signif	Positif
	Kandi	6.08.E-01	-8.51.E-03	Non signif	Négatif
	Karimama	1.40.E-01	-8.41.E-02	Non signif	Négatif
	Kokoro	9.25.E-01	-6.03.E-03	Non signif	Négatif
	Kouandé	1.11.E-01	-5.57.E-02	Non signif	Négatif
	Malanville	7.73.E-02	3.16.E-02	Non signif	Positif
	Natitingou	6.56.E-02	-8.99.E-02	Non signif	Négatif
	Nikki	8.63.E-01	-5.99.E-03	Non signif	Négatif
	Okpara	4.97.E-01	3.37.E-02	Non signif	Positif
	Ouessè	3.93.E-01	-4.23.E-02	Non signif	Négatif
	Parakou	3.86.E-02	-1.13.E-01	Signif	Négatif
	Patargo	5.23.E-01	-3.59.E-02	Non signif	Négatif
	Pénéssoulou	9.25.E-01	-7.32.E-03	Non signif	Négatif
	Pira	1.46.E-01	-8.95.E-02	Non signif	Négatif
	Tanguiéta	7.21.E-01	-7.37.E-03	Non signif	Négatif
	Tchaourou	4.98.E-01	-2.85.E-02	Non signif	Négatif
	Toui	4.43.E-01	4.90.E-02	Non signif	Positif
ZONE DE TRANSITION	Dassa-Zoumé	4.39.E-01	4.41.E-02	Non signif	Positif
	Gouka	1.28.E-01	8.84.E-02	Non signif	Positif
	Savalou	1.32.E-01	5.52.E-02	Non signif	Positif
	Savè	5.95.E-01	-1.68.E-02	Non signif	Négatif
	Tchetti	3.36.E-02	1.49.E-01	Signif	Positif

Les résultats de ce tableau montrent que pour le régime unimodal la zone soudannienne connaît des tendances significatives positives à Kalalé et Bassila mais négatives à Parakou. La station de Tchetti est l'unique de la zone de transition à présenter des tendances significatives et positives.

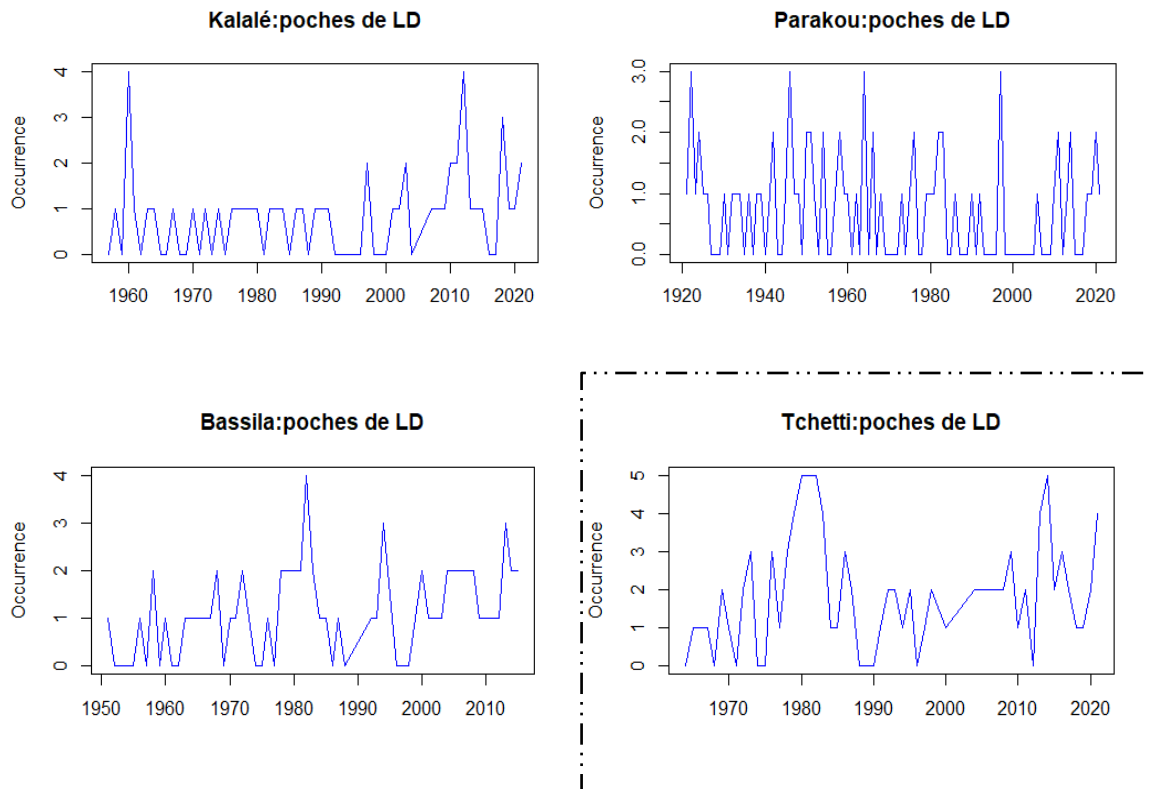


Figure 10: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de longue durée en régime unimodal.

On peut donc de cette analyse, conclure qu'au fil du temps les poches de longue durée ont une occurrence plus croissante dans la zone de transition à régime unimodal.

➤ Régime bimodal

Tableau 5: Tendances des poches de longue durée pour le régime bimodal (grande saison de pluies).

Grande saison	Stations	p-Value	U (tau de Kenadall)	Tendance au seuil de 5%	Sens de la tendance
ZONE DE TRANSITION	Abomey	7.38.E-01	-1.48.E-02	Non signif	Négatif
	Agouna	8.95.E-01	5.49.E-03	Non signif	positif
	Bohicon	2.38.E-01	3.97.E-02	Non signif	positif
	Ketou	5.34.E-02	-4.22.E-02	Non signif	Négatif
	Lonkly	3.75.E-01	2.10.E-02	Non signif	positif
	Zagnanado	7.61.E-01	-1.03.E-02	Non signif	Négatif
ZONE SUB-EQUATORIALE	Aplahoue	1.17.E-01	-1.05.E-01	Non signif	Négatif
	Bonou	4.06.E-02	2.40.E-01	Signif	positif
	Cotonou	3.38.E-02	1.08.E-01	Signif	positif
	Niaouli	2.20.E-02	2.30.E-01	Signif	positif
	Pobè	5.49.E-02	7.34.E-02	Non signif	positif
	Toffo	1.81.E-02	1.65.E-01	Signif	positif

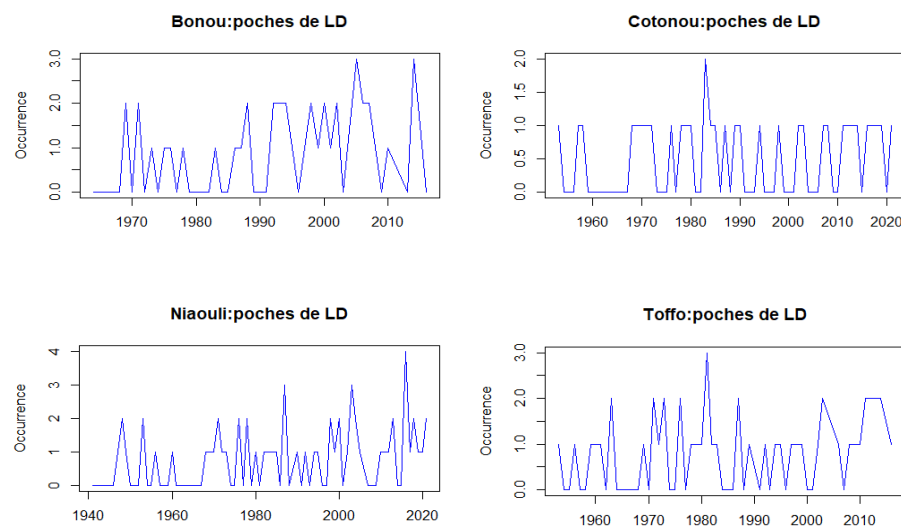


Figure 11: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de longue durée en régime bimodal (grande saison de pluies).

Les résultats obtenus du tableau##, montrent que pendant la grande saison des pluies toutes les stations de la zone de transition à régime bimodal présentent des tendances non significatives. Dans la zone subéquatoriale, les tendances significatives obtenues, sont toutes positives (Bonou, Cotonou, Niaouli et Toffo).

Tableau 6: Tendances des poches de longue durée pour le régime bimodal (petite saison de pluies).

Petite saison	Stations	p-Value	U (tau de Kenadall)	Tendance au seuil de 5%	Sens de la tendance
ZONE DE TRANSITION	Abomey	3.62.E-01	2.64.E-02	Non signif	positif
	Agouna	6.51.E-01	1.15.E-02	Non signif	positif
	Bohicon	8.55.E-01	-5.12.E-03	Non signif	Négatif
	Ketou	8.48.E-01	4.83.E-03	Non signif	positif
	Lonkly	7.51.E-02	6.00.E-02	Non signif	positif
	Zagnanado	5.68.E-02	-7.54.E-02	Non signif	Négatif
ZONE SUB-EQUATORIALE	Aplahoue	8.68.E-01	5.68.E-03	Non signif	positif
	Bonou	3.50.E-01	-4.08.E-02	Non signif	Négatif
	Cotonou	5.66.E-01	2.69.E-02	Non signif	positif
	Niaouli	4.04.E-01	2.76.E-02	Non signif	positif
	Pobè	2.07.E-02	-8.14.E-02	Signif	Négatif
	Toffo	8.41.E-02	-1.36.E-01	Non signif	Négatif

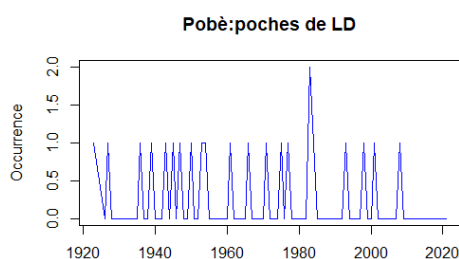


Figure 12: Variabilité temporelle de l'occurrence des poches de longue durée en régime bimodal (petite saison de pluies).

De ce tableau, on remarque pour la petite saison des pluies dans tout le régime bimodal, la seule tendance significative est obtenue à Pobè (négative).

2.4 Poches de sécheresse à l'échelle régionale au Bénin

Les résultats ci-dessous montrent l'étendue des poches de sécheresse sur l'ensemble des zones climatiques. Il s'agit de faire une comparaison entre les zones. Dans le souci d'être objectif la période d'observation pour toutes les stations a été coupée de 1971 à 2021 afin de faire la comparaison sur les mêmes périodes. Le choix de cette période s'explique à cause de la grande sécheresse de 1970 dont le Bénin a aussi été victime.

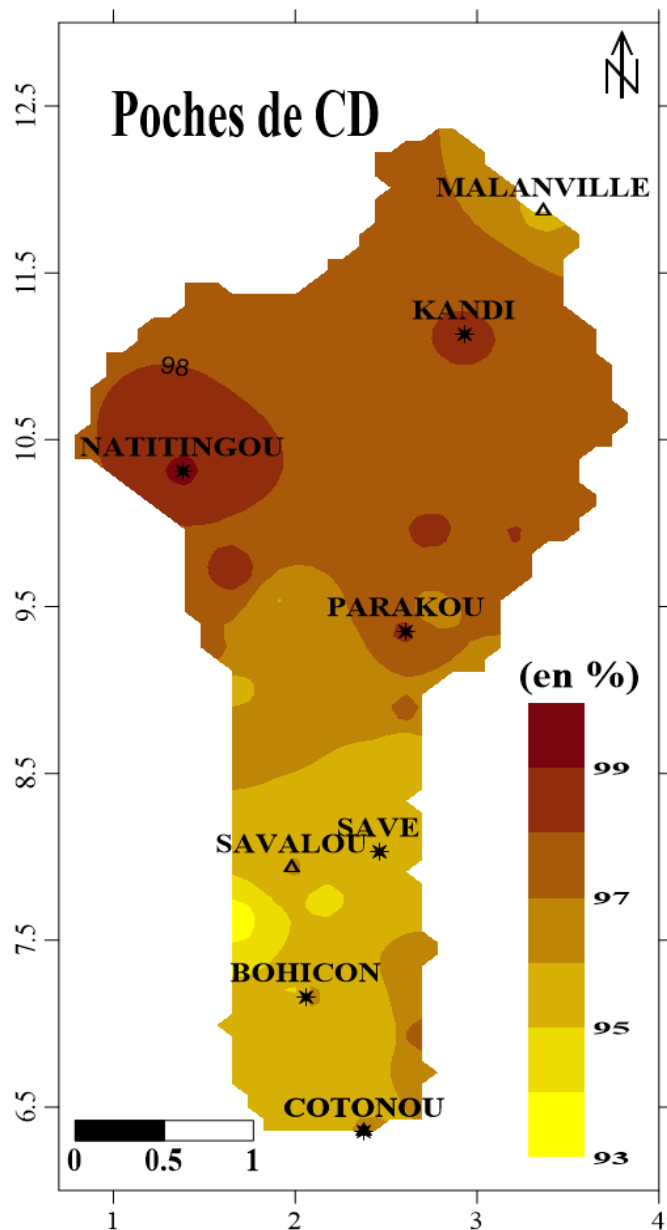


Figure 13: Probabilité de l'occurrence d'une poche de sécheresse de courte durée au Bénin (1971-2021).

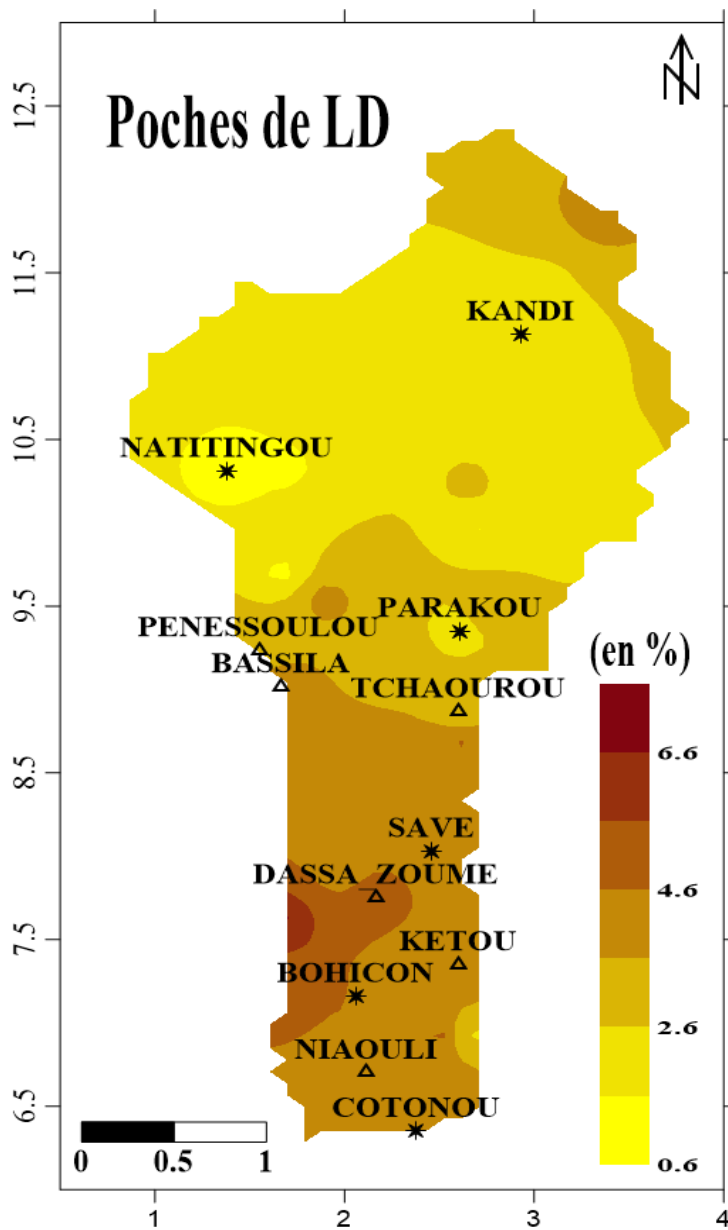


Figure 14: Probabilité de l'occurrence d'une poche de sécheresse de longue durée au Bénin (1971-2021).

Les **figures 13** et **14** présentent respectivement la probabilité de l'occurrence des poches de sécheresse de courte durée et longue durée sur la période 1971-2021 d'une zone climatique à une autre au Bénin.

L'analyse de la **Figure 13** permet de constater pour le régime pluviométrique au Bénin, les poches de CD ont une forte probabilité d'apparition dans la zone soudanienne que subéquatoriale. Les probabilités au niveau de la zone transition (régime unimodale et bimodal) sont semblable à ceux de la zone subéquatoriale. La plus forte est d'environ 99% obtenue à Natitingou et la plus faible est enregistré du côté ouest de la zone de transition à régime bimodal. Notons qu'à l'extrême nord du régime unimodal les probabilités avoisine ceux de la zone sud du pays soit 95%.

La **Figure 14** montre qu'au Bénin, le régime pluviométrique enregistre plus de poches de longue durée dans zone subéquatorial et de transition (unimodal et bimodal) que dans la zone soudanienne. Natitingou donne la plus faible valeur (soit 0.6%) et les fortes sont obtenues du côté ouest de la zone de transition à régime bimodal. Aussi précisons que l'extrême nord du pays présente une sensibilité à l'occurrence des poches de courtes durées semblable au fait constat fait dans les zones du régime bimodal.

2.5 Discussion

La caractérisation des poches de sècheresse a été faite suivant une analyse probabiliste et spatio-temporelle. Ainsi la modélisation des poches de sécheresse comme étant des évènements stochastiques, a permis de savoir la chaine de Markov qui donne un meilleur ajustement des distributions empirique de ces évènements. Les résultats de la présente étude montrent que les chaines de Markov d'ordre 2 s'ajuste le mieux à la distribution empiriques des probabilités d'occurrence des poches de sècheresse suivant leurs longueurs. Ce résultat est en conformité avec celui des travaux de Fodé et al. (1995) effectuer au Niger et Ouédraogo (2013) au Burkina, lesquelles ont aussi conclurent sur l'occurrence élevée des poches de courte durée comparée à celle des poches de longue durée durant les saisons pluvieuses au Bénin.

Les résultats du test de tendance ont permis d'avoir des tendances significatives dans la plupart des régions de chaque régime pluviométrique au Bénin. Au niveau du régime unimodal, les tendances significatives obtenues (plus de la moitié des stations étudiées pour ce régime) sur l'occurrence de

poches de courte durée sont majoritairement positives dans la zone soudanienne et négatives dans la zone de transition. Des tendances significatives ont été enregistrées sur l'occurrence des poches de longue durée dans très peu de stations dudit régime. Pour ce qui est du régime bimodal, les tendances significatives obtenues sur l'occurrence de poches de courte durée, sont négatives. Le constat fait est contraire lorsqu'il s'agit de l'occurrence des poches de longue durée. Ce résultat justifie les travaux de Oyédé et al. (2019) : « la répartition inégale des pluies se traduit entre autres par une diminution du nombre d'événements pluvieux, un nombre élevé des épisodes secs, l'apparition d'événements extrêmes, des débuts tardifs et des fins précoces de pluies dans un contexte de réchauffement thermique ». Aussi nos résultats concordent avec ceux obtenus par Gong et al. (2004) qui ont trouvé une tendance positive significative dans la durée des poches de sécheresse dans différentes régions de Chine.

Au lendemain de la sécheresse de 1970 dont le Bénin a aussi été victime, il ressort de notre analyse que dans le régime bimodale (précisément dans les environs d'Agouna) enregistre plus de poches de longues durées. Cependant l'occurrence des poches de courtes durées est plus élevée dans la région soudanienne (plus dans les alentours de Natitingou) que dans la région subéquatoriale où les faibles probabilités sont obtenues. Notons que l'extrême nord du pays est aussi sensible à l'occurrence des poches de longue durée que celles de courtes durées. Ce qui confirme en partie l'analyse de Abgozo et al. (2021) : « L'occurrence des poches de longue durée surtout au-delà de 10 jours en alternance avec de courts ou longs événements humides est plus importante dans la partie sud du Bénin ».

2.6 Conclusion partielle

Au terme de ce chapitre, nous avons constaté que l'analyse probabiliste a permis de choisir la chaîne de Markov d'ordre 2 comme donnant un meilleur ajustement de la probabilité d'occurrence des poches de sécheresse suivant leurs différentes durées (longueurs). De plus l'analyse temporelle a montré que les poches LPS_10 ont augmenté en majorité sur tout le Bénin de 1991 à 2021. L'étendue des poches de sécheresse dans leur globalité a été analysée.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce travail a été fait pour mieux cerner l'occurrence des poches de sécheresse suivant les différentes longueurs pour le seuil de 1mm de pluie journalière dans le régime pluviométrique au Bénin sur la période allant de la création de chaque station jusqu'en 2021.

Les chaînes de Markov d'ordre 2 et 3 ont donné un ajustement différent de la distribution empirique de la probabilité d'occurrence des poches de sécheresse de chaque longueur. Des résultats obtenus on conclut que la chaîne de Markov d'ordre 2 donne un ajustement meilleur de la distribution empirique. Cependant l'occurrence des poches de sécheresse de longue durée (supérieures à 10 jours) est moindre à celles de courte durée durant la saison humide au Bénin.

Les résultats du test de Mann-Kendall modifié pour la tendance des différentes poches de sécheresse, a permis de répondre favorable à notre deuxième question de recherche. Au nombre des tendances significative obtenues, le Benin, jusqu'en 2021 a connu dans sa partie soudanienne moins d'espacement entre les jours pluvieux. Cette conclusion est tirée du fait qu'il y a une évolution temporelle croissante sur l'occurrence des poches de courte durée dans cette zone du régime pluviométrique. Cependant l'occurrence des poches de longue durée est significativement croissante dans beaucoup de régions du régime bimodal surtout pendant la grande saison des pluies. Au nord les tendances obtenues sont pour la plupart non significatives. La survenue des poches de sécheresse d'une durée supérieure à 10 jours alternant avec des épisodes humides courts ou longs sont à prendre en considération en raison du risque de stress hydrique qu'elles peuvent causer.

La distribution à l'échelle spatiale à l'aide de la méthode d'interpolation de l'IDW, a permis de conclure que les poches de longue durée sont plus fréquentes durant les saisons pluvieuses dans les zones du régime bimodal (plus accentué au centre-ouest aux alentours d'Agouna) et celles de l'extrême nord du pays. Par contre les poches de courte durée sont plus prévisibles dans la région soudanienne (excepté dans l'extrême nord) et dans la partie sud-est de la zone subéquatoriale aux alentours de Pobè. La région subéquatoriale du pays (Cotonou à Savè) surtout à Bohicon, est donc la plus sensible aux dégâts engendrés par les risques du stress hydrique. Soit l'une des raisons pour laquelle le rendement agricole mieux apprécié au Nord-Bénin qu'au sud.

Les limites de notre étude se résument aux nombreuses lacunes dans les données pluviométriques utilisées surtout des stations météorologiques qui entache l'interprétation des travaux sur les

variabilités climatiques. A ce titre un suivi plus rigoureux dans la collecte des données pluviométriques quotidiennes au niveau des stations météorologiques au Bénin est recommandé pour qu'il y ait moins de lacunes pour répondre efficacement aux futures recherches avec des séries temporelles plus étendues.

D'autres pistes de recherches ont nourri notre centre d'intérêt pour des études futures :

- a. Evaluation de l'impact des poches de sécheresse au Bénin sur un domaine d'application tel que : agriculture, l'hydroélectricité, le réseau hydrographique ...
- b. Projection future de l'occurrence des poches de sécheresse en prenant en compte la variabilité associée aux températures de l'air.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adam, K. S., & Boko, M. (1993). Le Bénin. *Edicef*, 2ème édition, 93.
- Afouda, A., & Adiosso, P. (1997, Avril). Etude Stochastique des structures de séquences sèches au Bénin. *Sustainability of Water Ressources under Increasing Uncertainty*(240), 43-50.
- Agbozo, M. N., Adéchinan, J. A., N'gobi, G. K., & Bessou, J. (2021). Analysis and Predictability of Dry Spell Lengths Observed in Synoptic Stations of Benin Republic (West Africa). *American Journal of Climate Change.*, 597-618.
- Al Hamndou, D., & Requier-Desjardins, M. (2008). Variabilité climatique, désertification et biodiversité en Afrique : S'adapter, une approche intégrée. *Vertigo*. Récupéré sur Google.
- Analyse Globale de la Vulnérabilité et de la Sécurité Alimentaire (AGVSA), République du Bénin.* (2017).
- Biao, E., & Alamou, E. (2018). Stochastics Modelling of Daily Rainfall for Decision Making in Water Management in Benin (West Africa). *Research and Advances Environmental Sciences*.
- Boko, M. (1988). Climatologie et communauté rurales du Bénin, rythmes climatiques et rythmes de développement. *Thèse de Doctorat d'Etat*. Université de Bourgogne.
- Bonsal, B. R., & Lawford, R. G. (1999). Teleconnections between El Nino and La Nina Events and Summer Extended Dry Spells on the Canadian Prairies. *International Journal of Climatology*(19), 1445-1458.
- Chaudry, Q., & Sheikh, M. (2001). *History's Worst Drought Conditions Prevailed over Pakistan*.
- Douguedroit, A. (1987). The Variations of Dry Spells in Marseilles from 1865 to 1984. *International Journal of Climatology*(7), 541-551.
- Epifani, C., Esposito, S., & Vento, D. (2004). Persistence of Wet and Dry Spells in Italy First Results in Milano from 1858 to 2000. In *Proceedings from the 14th International Conference on Clouds and Precipitation 2004* (pp. 18-24). Bologna.

- Ezeh, C. U., Obeta, M. C., & Anyadike, R. N. (2016). Variations in the Sequences of Daily Rainfall across Nigeria. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Fiala, T. O., & Hladný, J. (s.d.). Evolution of low flows in the Czech Republic. *Journal of Hydrology*(393(3-4)), 206-218.
- Fodé, M., & Amadou, O. (1993). *Analyse des séquences sèches au Niger de 1950 à 1991*. Niamey.
- Froidurot, S., & Diedhiou, A. (2017). Characteristics of Wet and Dry Spells in the West African Monsoon System. *Atmospheric Science Letters*.
- GIEC. (2007). Résumé à l'intention des décideurs. Bilan 2007 des changements climatiques : Impacts, adaptation et vulnérabilité (Rapport d'évaluation n°4) . Royaume Uni: Cambridge University Press,.
- Girma, B. A., Birtukan, A. H., Chul-Hee, L., & Woo-Kyun, L. (2000). Spatial and Temporal Analysis of Dry and Wet Spells in Upper Awash River Basin. *Water*.
- Gong, D. Y., Wang, J. A., & Han, H. (2005). Trends of Summer Dry Spells in China during the Late Twentieth Century. *Meteorology and Atmospheric Physics*(88), 203-214.
- Growing, J. (2003). . *Food security for sub-Saharan Africa: does water scarcity limit the options?* *Land Use and Water Resources Research*.
- Hamed, K. (2008). Trend detection in hydrologic data: the Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*(349(3)), 350–363.
- Hamed, K., & Rao, A. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*(204(1)).
- Huth, R., Kyselyy, J., & Pokorna, L. (2000). A GCM Simulation of Heat Waves, Dry Spells, and Their Relationships to Circulation. *Climatic Changes*. (88), 26-60.
- INSAE. (2016). *Effectifs de la population des villages et quartiers de ville du Bénin (RGPH-4, 2013)*.
- Kendall, M. (1975). *Rank Correlation Methods*. London: Griffin, Co.

- Khalik, M. (2009). Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: a review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. *Journal of Hydrology*, 117-130.
- Kumar Kumar, N., Shamim, T., Lall, P., Saga, S., & Kumar, A. (2009). Assessment of flood with its social consequences and environmental law. *Journal of Environmental Research and Development* 3(4), 1013 – 1019.
- Kundzewicz, Z., & Robson, A. (2000). Detecting trend and other changes in hydrological data. *World Climate Programme—Water, World Climate Programme Data and Monitoring*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Lázaro, R., Rodrigo, F. S., Gutierrez, L., Domingo, F., & Puigdefáfragas, J. (2001). Analysis of 30-Year Rainfall Record in Semi-Arid SE Spain for Implications on Vegetation. *Journal of Arid Environment*(48), 373-395.
- Lemaitre. (2002). *Identification de ruptures dans la série pluviométrique de Kouandé*.
- Mann, H. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*(13), 245-259.
- Mkandawire, M. (2013). *INVESTIGATING DRY SPELLS IN MALAWI DURING THE RAINFALL SEASON*. Nairobi, Kenya.
- Ouedraogo, L. (2013). Prédétermination des séquences sèches et intérêt de l'information climatique sur la production céréalière en zone sahélienne.
- Oyédé, M. I., Hounzime, S., Agbokou, I., Alhassane, A., & Yabi, I. (2022). Caractéristiques Spatio – temporelles de la Variabilité Climatique au Bénin (Afrique de l'ouest). *European Scientific Journal, ESJ*.
- PNUD. (2015). *Rapport sur le développement humain*.
- Rockstrom, J. (2000). Water Resources Management in Smallholder Farms in Eastern and Southern Africa: An Overview. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*.

- Salack, S., Klein, C., Giannini, A., Sarr, B., Worou, O. N., Belko, N., . . . Kunstman, H. (2016). Global Warming Induced Hybrid Rainy Seasons in the Sahel. *Environmental Research Letters*, 11, Article ID: 104008.
- Sanogo, S., Fink, A. H., Omotosho, J. A., Ba, A., Redl, R., & Ermert, V. (2015). Spatio-Temporal Characteristics of the Recent Rainfall Recovery in West Africa. *International. Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*(35), 4589-4605.
- Seleshi, Y., & Camberlin, P. (2006). Recent Changes in Dry Spell and Extreme Rainfall Events in Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*.
- Sinha, T. a. (2008). Time series analysis of soil freeze and thaw processes in indiana. *Journal of Hydrometeorology*(9 (5)), 936–950.
- Sivakumar. (1992). Empirical Analysis of Dry Spells for Agricultural Applications in West Africa. *Journal of Climate*.
- Stoute, S. K.-R. (2008). Rainfall and temperature analyses for select stations in the Caribbean, A Demonstration from Training Attachment at the Statistical Service Center University of Reading.
- Xiong, L., & Guo, S. (2004). Trend test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station/Test de tendance et détection de rupture appliqués aux séries de débit annuel du fleuve Yangtze à la station hydrologique de Yic. *Hydrological Sciences Journal*(49 (1)), 99–112.
- Yue, S., & Wang, C. (2004). The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management*(18 (3)), 201-218.

ANNEXE

Tableau 7: Description géographique des stations de l'étude.

STATIONS	LONGITUDE	LATITUDE	PERIODE D'ETUDE
Abomey	1.983333	7.183333	1921-2021
Agouna	1.7	7.55	1968-2021
Alfakoara	3.07	11.44	1969-2021
Aplahoué	1.67364	6.94213	1986-2021
Banikoara	2.433333	11.3	1954-2021
Bantè	1.883333	8.416667	1942-2021
Bassila	1.666667	9.016667	1950-2021
Bembèrèkè	2.666667	10.2	1921-2021
Beterou	2.266667	9.2	1953-2021
Bohicon	2.066667	7.166667	1940-2021
Bonou	2.5	6.933333	1964-2021
Cotonou	2.38	6.35	1952-2021
Dassa-Zoumè	2.166667	7.75	1941-2021
Djougou	1.666667	9.7	1921-2021
Gouka	1.95	8.133333	1968-2021
Ina	2.733333	9.966667	1947-2021
Kalalé	3.381675	10.290071	1957-2021
Kandi	2.93	11.13	1921-2021
Karimama	3.183333	12.05	1976-2021
Kétou	2.6	7.35	1950-2021
Kokoro	2.616667	8.4	1968-2021
Kouandé	1.683333	10.333333	1931-2021
Lonkly	1.65	7.15	1955-2021
Malanville	3.366667	11.8667	1942-2021
Natitingou	1.383333	10.316667	1921-2021
Niaouli	2.116667	6.7	1941-2021
Nikki	3.2	9.933333	1921-2021
Okpara	2.733333	9.466667	1956-2021
Ouessè	2.383333	8.5	1964-2021
Parakou	2.6	9.35	1921-2021
Partago	1.9	9.533333	1969-2021
Pénessoulou	1.55	9.233333	1969-2021
Pira	1.716667	8.65	1968-2021
Pobè	2.666667	6.933333	1921-2021
Savalou	1.983333	7.933333	1921-2021
Savè	2.466667	8.033333	1921-2021

Tanguiéta	1.266561	10.617122	1939-2021
Tchaourou	2.6	8.866667	1937-2021
Tchetti	1.666667	7.633333	1964-2021
Toffo	2.05	6.51	1971-2021
Toui	2.6	8.666667	1944-2021
Zagnanado	2.333333	7.25	1921-2021