

Persistance des Séquences Pluvieuses et Risque d'Inondation en Côte d'Ivoire de 1971 à 2022

Kolotioloma Alama Coulibaly

Kouadio Christophe N'Da

Daouda Sylla

Pauline Agoh Dibi-Anoh

Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Bi Tié Albert Goula

Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire

[Doi: 10.19044/esipreprint.1.2024.p23](https://doi.org/10.19044/esipreprint.1.2024.p23)

Approved: 08 January 2024

Posted: 10 January 2024

Copyright 2024 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Coulibaly K.A., N'Da K.C., Sylla D., Dibi- Anoh P.A. & Goula B.T.A. (2024). *Persistance des Séquences Pluvieuses et Risque d'Inondation en Côte d'Ivoire de 1971 à 2022*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.1.2024.p23>

Résumé

Avec le réchauffement climatique mondial, les inondations sont devenues plus récurrentes en Afrique de l'Ouest, particulièrement en Côte d'Ivoire. Ainsi, la présente étude vise à estimer la contribution de la persistance des séquences pluvieuses dans l'accroissement des risques d'excès pluviométrique en Côte d'Ivoire. Pour cela, les données journalières de 1971 à 2022 des 14 stations synoptiques de la Direction de la Météorologie Nationale de Côte d'Ivoire sont utilisées. L'approche méthodologique comporte les chaînes de Markov, la loi de Gumbel et l'analyse fréquentielle des pluies journalières extrêmes. Les résultats indiquent qu'il y a plus de chance qu'il pleuve au nord et à l'ouest de la Côte d'Ivoire si la veille est sèche. En revanche, au centre, sud et le littoral, c'est lorsque la veille est pluvieuse que la probabilité de pluie est élevée. Cette probabilité est plus forte au nord-ouest et sur le littoral qu'au centre et sud. Au nord et à l'ouest de la Côte d'Ivoire, la période juillet à septembre enregistre 74,5 à 84,6% des années à pluie extrême alors que sur le littoral, c'est 61,5 à 76,9% durant la première saison pluvieuse d'avril à juin. Au centre et sud ivoiriens, ce sont 21,2 à 58,3% des années qui ont des pluies maximales entre avril et novembre. Les excès pluviométriques enregistrés

pendant les périodes pluvieuses augmentent le risque d'inondation en Côte d'Ivoire même pour des pluies normales à durée de retour inférieure à six ans.

Mots-clés: Côte d'Ivoire, probabilité, jour pluvieux, risque d'inondation, durée de retour

Persistence of Wet Spells and Risk of Flood in Cote d'Ivoire from 1971 to 2022

Kolotioloma Alama Coulibaly

Kouadio Christophe N'Da

Daouda Sylla

Pauline Agoh Dibi-Anoh

Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Bi Tié Albert Goula

Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire

Abstract

With global warming, floods are become more recurrent in West Africa, particularly in Cote d'Ivoire. Thus, this study aims to estimate the contribution of the persistence of rainy spells in the increasing risks of excess rainfall in Cote d'Ivoire. For this, daily rainfall data from 1971 to 2022 for 14 synoptic stations of National Metgeorological Service of Cote d'Ivoire are used. The methodological approach includes Markov chains, Gumbel's law and frequency analysis of extreme daily rainfall. The results indicate that there is a greater chance of rain in the north and west of Cote d'Ivoire if the day before is dry. However, in the centre, south and coastal, it is when the day before is rainy that the probability of rain is high. This probability is higher in the northwest and on the coastal than in the centre and south. In the north and west of Cote d'Ivoire, period from july to september records 74.5 to 84.6% of years with extreme rain while on the coastal, it is 61.5 to 76.9% during the first rainy season from april to june. In the centre and south of Cote d'Ivoire, 21.2 to 58.3% of years have maximum rainfall between april and november. The excess rainfall recorded during rainy seasons increase the risk of flood in Cote d'Ivoire even for normal rains with a return period less than six years.

Keywords: Cote d'Ivoire, probability, rainy day, risk of flood, return period

Introduction

Le réchauffement climatique actuel que connaît le monde est à l'origine de l'accroissement de phénomènes météorologiques qui sont responsables des risques hydroclimatiques dont les inondations, les sécheresses, les vents violents, les vagues de chaleur (GIEC, 2014). Suivant les prédictions, ces extrêmes climatiques devraient se multiplier et gagner en intensité avec des conséquences qui pourraient se révéler effroyables pour les populations (GIEC, 2014). En effet, les catastrophes naturelles constituent une source importante de destructions et de dégâts humains. Au cours de la décennie 2005-2014, il y a eu 3 253 événements hydrométéorologiques dangereux ont été recensés dans le monde. Ils ont fait 283 035 victimes et causé des pertes économiques évaluées à 983 000 000 dollars Etats Unis d'Amérique (<https://public.wmo.int/fr/>).

Les inondations et ses corollaires de glissements de terrain sont les plus destructrices, particulièrement dans les régions à faibles et moyens revenus (ISDR, 2011). Cette catastrophe est liée aux fortes pluies durant les saisons humides. En Côte d'Ivoire, une recrudescence des inondations, perturbant le bon déroulement des activités socio-économiques, est observée au cours de ces dernières décennies. C'est le cas en juin 2018 où de nombreux dommages matériels et humains ont été enregistrés à la suite de pluie diluvienne (RCI, 2019). La plupart de ces dégâts sont causés par le ruissellement des eaux de pluie. De ce constat, les pouvoirs publics et les acteurs ont mené plusieurs évaluations afin de cerner les causes, les impacts, la vulnérabilité des populations et prendre des mesures idoines face aux risques futurs de ce risque hydroclimatique (RCI, 2019). Si Abidjan, la capitale économique de la Côte d'Ivoire, a fait l'objet de plusieurs prospections sur les pluies extrêmes et risques d'inondation (Konaté et al., 2016 ; Kouassi et al., 2018), très peu d'études ont concerné les grandes agglomérations de l'intérieur du pays (Soro et al., 2016 ; Diarrassouba et al., 2022). Pourtant, selon les rapports de l'Office National de la Protection Civile (ONPC) de Côte d'Ivoire, les inondations récentes observées depuis les années 2010 ont occasionné des dégâts matériels et humains dans certaines localités telles que Aboisso, Agboville, Bonoua, Bouaké, Grand-Bassam, Korhogo, San-Pédro, Tiassalé et Toulepleu.

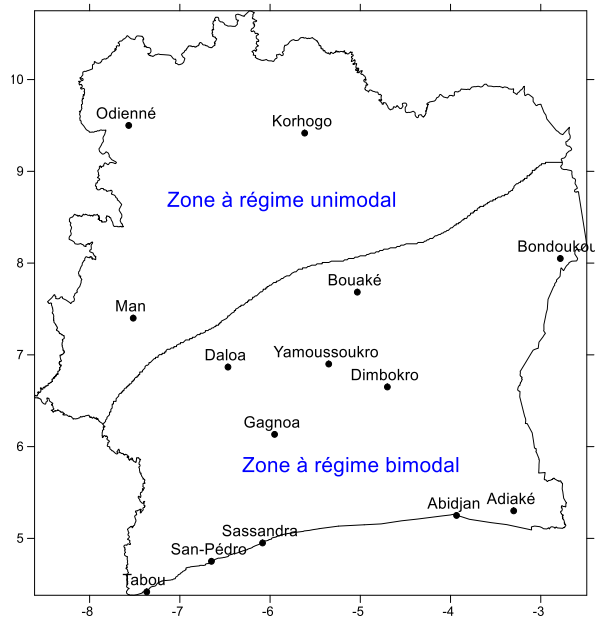
Pour prévenir les populations des risques hydroclimatiques en saison pluvieuse, les chercheurs sont amenés à produire des services climatiques, contribuant ainsi au renforcement de la capacité d'adaptation des populations et des secteurs d'activités. Ainsi, vu l'ampleur des inondations pluviales sur tout le territoire ivoirien, la présente étude va se focaliser sur l'analyse des séquences des jours pluvieux pendant les saisons des pluies. En effet, la connaissance des probabilités de jours pluvieux à l'avance constitue un outil

de prévention pour la gestion, l'utilisation rationnelle des ressources techniques et la planification des activités au cours de l'année. C'est pourquoi cette recherche ambitionne d'estimer la contribution de la persistance des séquences pluvieuses dans l'accroissement des risques d'excès pluviométrique en Côte d'Ivoire. Ces excédents de pluie sont à la base des inondations en Côte d'Ivoire

Méthodologie

Présentation de la zone d'étude

Située en Afrique de l'Ouest entre les latitudes 4° et 11° nord et les longitudes 2° et 9° ouest, la Côte d'Ivoire couvre une superficie de 322 462 km² (Figure 1). Sa population est estimée à 29 389 150 habitants (INS-RGPH, 2021).



Adapté de Ndabalishye (1995)

Figure 1. Localisation des zones pluviométriques homogènes de la Côte d'Ivoire

Le nord de la Côte d'Ivoire présente un climat tropical subhumide à sec tandis que le sud enregistre un climat tropical humide (Ndabalishye, 1995). Le premier type de climat comporte une saison sèche et une pluvieuse centrée sur juillet-août-septembre avec le pic pluviométrique en août ou septembre. Le second comprend deux saisons des pluies et deux sèches. La première saison humide est plus longue et intense, et se situe entre avril et mi-juillet. La deuxième est plus courte et couvre la période de septembre à novembre. Chaque saison pluvieuse est suivie par une saison sèche (Coulibaly et al., 2019a).

Données

Les données journalières de pluie sur la période 1971-2022 sont collectées à la Direction de la Météorologie Nationale (DMN), située au sein de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) de la Côte d'Ivoire. Ces relevés proviennent des enregistrements effectués dans les 14 stations synoptiques du territoire national. Ces localités sont listées en suivant le découpage climatique de la Côte d'Ivoire du Nord-est vers le Sud-ouest. Il s'agit de Korhogo, Odienné (zone Nord), Man (zone Ouest), Bondoukou, Bouaké, Daloa (zone Centre), Dimbokro, Yamoussoukro, Gagnoa (zone Sud), Adiaké, Abidjan, Sassandra, San-Pédro et Tabou (zone du littoral). Ces postes sont retenus du fait de la régularité des observations et de leur fonctionnement continu. De plus, ces stations disposent d'informations régulières et homogènes sur la période d'étude. Toutefois, il faut noter que les données observées par la Compagnie Ivoirienne pour le Développement des Textiles (CIDT), Ivoire Coton et la Société Sucrière Ivoirienne (Sucrivoire) ont permis de combler les données manquantes entre 2002 et 2017 pour Korhogo, Odienné, Bouaké et Man. Avant la phase de traitement, les données ont été contrôlées afin de s'assurer de leur qualité et homogénéité.

Calcul des probabilités de jour pluie selon les chaînes de Markov

Il convient de souligner que dans cette étude, un jour est pluvieux lorsque le cumul de pluie est supérieur ou égal à 1 mm. Ce seuil permet d'avoir des informations utiles pour les gestionnaires des ressources en eau et les agriculteurs. Ainsi, la persistance des séquences des jours pluvieux est basée sur l'utilisation des chaînes de Markov d'ordre 1 et 2. Cette méthode énonce des probabilités conditionnelles de plusieurs événements et détermine celles d'avoir des jours de pluie sous certaines conditions. Le calcul est basé sur l'application du théorème de Bayes qui est un corollaire du théorème de probabilité totale. Plusieurs auteurs (Meddi et Meddi, 2009 ; Allé et al., 2013 ; Meledje et al., 2015) ont montré la possibilité d'utiliser les chaînes de Markov pour des jours pluvieux ou secs. Le modèle des chaînes de Markov est un modèle stochastique, itératif. Ce processus exprime des probabilités conditionnelles de passage de l'état d'un ou deux jours précédents à l'état de jour pluvieux en cours. Ainsi, l'état du jour j ne dépend que de l'état du jour $j - 1$ pour un modèle de Markov d'ordre 1; et des états $j - 1$ ainsi que $j - 2$ pour celui d'ordre 2. Partant, ces modèles sont appliqués aux valeurs pluviométriques journalières de 1971 à 2022 afin de déterminer la probabilité d'avoir un jour pluvieux sachant que l'état du jour précédent ou des deux jours antérieurs est sec ou pluvieux.

Pour un processus d'ordre 1 des chaînes de Markov, la probabilité pour qu'il pleuve le jour (P) dépend de l'état du jour précédant pluvieux (r) ou sec (d) et est notée comme suit :

- Prr = probabilité d'avoir un jour pluvieux sachant que le jour précédent était pluvieux ;
- Prd = probabilité d'avoir un jour pluvieux sachant que le jour précédent était sec.

Pour ce qui est du processus d'ordre 2, la probabilité pour qu'il pleuve le jour (P) dépend de l'état des deux jours précédents et est notée comme suit :

- $Prdd$ = probabilité d'avoir un jour pluvieux sachant que les deux jours précédents étaient secs ;
- $Prdr$ = probabilité d'avoir un jour pluvieux sachant que la veille était jour sec et l'avant-veille était jour pluvieux ;
- $Prrd$ = probabilité d'avoir un jour pluvieux sachant que la veille était jour pluvieux et l'avant-veille était jour sec ;
- $Prrr$ = probabilité d'avoir un jour pluvieux sachant que les deux jours précédents étaient pluvieux.

Ces probabilités sont calculées pour chacune des 14 stations avant d'être moyennées par saison pluvieuse. Au Nord et Ouest de la Côte d'Ivoire, la saison des pluies est centrée sur Juillet-Août-Septembre (JAS) alors qu'au Centre, au Sud et sur le littoral, ce sont Avril-Mai-Juin (AMJ) et Septembre-Octobre-Novembre (SON) qui sont les périodes les plus pluvieuses.

Analyse fréquentielle des pluies maximales sur trois jours consécutifs

La plupart des inondations observées en Côte d'Ivoire sont dues à des pluies diluviennes d'une durée moyenne de un à trois jours continus (Konaté et al., 2016). Dans cette situation, les sols sont souvent remplis d'eau et l'infiltration devient nulle. C'est pour cela que les pluies maximales sur trois jours consécutifs sont calculées de 1971 à 2022 pour chaque localité, puis soumises à une analyse fréquentielle. Ainsi, les taux des années ayant enregistré des pluies extrêmes pour chaque saison sont déterminés de même que la valeur maximale et la date correspondante. Le but est de connaître la fréquence des pluies extrêmes des jours consécutifs pendant les saisons pluvieuses en Côte d'Ivoire.

Détermination des durées de retour des pluies extrêmes journalières

Les événements pluviométriques extrêmes sont analysés en se basant sur leurs durées de retour. La loi de Gumbel par ajustement à la méthode graphique est appliquée aux hauteurs de pluie journalière maximale de 1971

à 2022 pour chaque localité. Le but est de vérifier si les épisodes pluvieux, sources d'inondation en Côte d'Ivoire, pourraient être qualifiés d'extrêmes ou non. La durée de retour caractérise le temps statistique entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée. La fonction de répartition de la loi de Gumbel se définit ainsi :

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-a}{b} \right) \right]$$

avec la variable réduite $u = \frac{x-a}{b}$

a et b sont les paramètres du modèle de Gumbel.

La fonction de distribution devient alors $F(x) = \exp(-\exp(-u))$ et $u = -\ln(-\ln(F(x)))$.

La durée ou période de retour d'un événement (T) est définie comme étant l'inverse de la probabilité annuelle de dépassement de cet événement :

$$T = \frac{1}{1 - F(x_i)}$$

Avec $F(x_i) = \frac{r-0,5}{n}$ et $r = \text{rang}$; $n = \text{taille de l'échantillon considéré}$.

Selon Hangnon et al. (2015) et Kouassi et al. (2018), un événement pluvieux est qualifié de très exceptionnel si T est supérieure à 100 ans; d'exceptionnel si T est comprise entre 30 et 100 ans; de très anormal si T se situe entre 10 et 30 ans; d'anormal si T oscille entre 6 et 10 ans, et de normal si T est moins de 6 ans.

La mise en œuvre des méthodes des chaînes de Markov, de l'analyse fréquentielle des pluies maximales et de la détermination des durées de retour a permis d'obtenir les résultats. Ils sont présentés et discutés.

Résultats et discussion

Probabilités de jour pluvieux selon les chaînes de Markov d'ordre 1 et 2

Les probabilités saisonnières de jour de pluie après un jour pluvieux ou sec selon les chaînes de Markov d'ordre 1 sont dans le tableau 1.

Tableau 1 : Probabilités saisonnières de jour pluvieux selon les chaînes de Markov d'ordre 1 en Côte d'Ivoire

Zone	Localité	Avril-Mai-Juin (AMJ)		Juillet-Août- Septembre (JAS)		Septembre-Octobre- Novembre (SON)	
		<i>Prd</i>	<i>Prr</i>	<i>Prd</i>	<i>Prr</i>	<i>Prd</i>	<i>Prr</i>
Nord et Ouest	Korhogo	0,29	0,29	0,43	0,42	0,28	0,36
	Odienné	0,33	0,32	0,56	0,54	0,35	0,39
	Man	0,33	0,36	0,39	0,56	0,30	0,43
	Moyenne	0,32	0,32	0,46	0,51	0,31	0,39

Centre	Bondoukou	0,29	0,29	0,27	0,35	0,27	0,37
	Bouaké	0,30	0,33	0,26	0,37	0,23	0,35
	Daloa	0,31	0,32	0,30	0,46	0,28	0,41
	Moyenne	0,30	0,31	0,28	0,39	0,26	0,38
Sud	Dimbokro	0,32	0,34	0,22	0,37	0,25	0,32
	Yamoussoukro	0,32	0,35	0,24	0,40	0,26	0,38
	Gagnoa	0,41	0,43	0,26	0,43	0,34	0,42
	Moyenne	0,35	0,37	0,24	0,40	0,28	0,37
Littoral	Adiaké	0,41	0,47	0,24	0,45	0,33	0,45
	Abidjan	0,37	0,47	0,15	0,35	0,26	0,42
	Sassandra	0,33	0,47	0,15	0,39	0,23	0,38
	San-Pédro	0,33	0,47	0,19	0,45	0,27	0,44
	Tabou	0,36	0,53	0,32	0,64	0,36	0,59
	Moyenne	0,36	0,48	0,21	0,46	0,29	0,46

Au nord et ouest de la Côte d'Ivoire, en début (AMJ) et fin (SON) de saison pluvieuse, les probabilités des jours de pluie varient en moyenne entre 0,31 et 0,39. Elles sont faibles en pleine saison pluvieuse (JAS). Pendant cette période, les probabilités oscillent entre 0,46 et 0,51. Cependant, elles peuvent atteindre 0,56 à Odienné et Man. En général, les probabilités des localités Man et d'Odienné situées au nord-ouest sont plus élevées que celles de Korhogo située au nord de la Côte d'Ivoire. Cette différence peut s'expliquer par l'effet du relief montagneux au nord-ouest de la Côte d'Ivoire qui crée un microclimat plus humide. De plus, le régime pluviométrique de Korhogo est similaire à celui des pays sahéliens de l'Afrique de l'Ouest avec une pluviométrie influencée par les mouvements nord-sud de la zone de convergence intertropicale et marquée par un fort gradient nord-sud de pluviosité (Redelsperger et al., 2006).

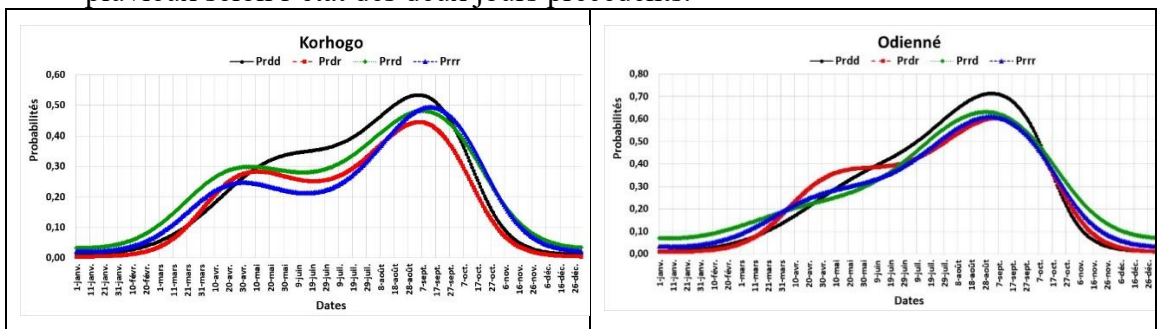
Au centre de la Côte d'Ivoire, les probabilités des jours pluvieux d'AMJ sont relativement identiques en moyenne autour de 0,30. Elles sont indépendantes du jour précédent au centre tout comme au nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Au cours des périodes JAS et SON, les *Prr* sont en moyenne 0,38 alors que les *Prd* fluctuent entre 0,26 et 0,28. Daloa enregistre les plus fortes probabilités jusqu'à 0,46 en JAS et 0,41 en SON pour ce qui est des *Prr*. Les plus faibles probabilités sont généralement observées à Bondoukou et Bouaké. La constance des probabilités de jour pluvieux au centre de la Côte d'Ivoire sur AMJ, JAS et SON entre 0,26 et 0,38 signale le caractère transitoire du régime pluviométrique entre unimodal et bimodal de cette zone.

Au sud ivoirien, les probabilités des jours pluvieux sont plus élevées que celles du centre au cours d'AMJ. Elles varient entre 0,35 et 0,37. En JAS, les probabilités oscillent entre 0,24 et 0,40 alors qu'en SON, elles

fluctuent entre 0,28 et 0,37. Pour les trois saisons, les plus fortes probabilités sont enregistrées à Gagnoa (0,43 pour *Prr* en AMJ et JAS) tandis que les plus faibles sont à Dimbokro (0,22 pour *Prd* en JAS).

Sur le littoral de la Côte d'Ivoire, les probabilités des jours pluvieux sont plus importantes en AMJ et SON qu'en JAS. Elles varient respectivement entre 0,36 et 0,48 pour AMJ et entre 0,29 et 0,46 pour SON. Il faut noter que ces deux périodes enregistrent le plus de pluie dans l'année sur le littoral. Tabou située dans l'extrême sud-ouest ivoirien enregistre les plus fortes probabilités jusqu'à 0,59 en SON pour les *Prr*.

Ainsi, au cours des périodes AMJ, JAS et SON, la probabilité d'un jour pluvieux précédé d'un jour de pluie (*Prr*) est généralement supérieure à celle précédée d'un jour sec (*Prd*) dans toutes les zones de la Côte d'Ivoire. De plus, les probabilités (*Prd* et *Prr*) de la période AMJ du nord, ouest, centre et sud fluctuent entre 0,30 et 0,37 à l'exception du littoral où elles sont élevées. Cela signale qu'en début de saison des pluies, la probabilité des jours pluvieux est indépendante de l'état du jour précédent. En effet, le démarrage de la saison des pluies en Côte d'Ivoire se caractérise par l'entrée progressive des vents de mousson sur le continent du Sud vers le Nord suivant le mouvement de la zone de convergence intertropicale en Afrique de l'Ouest avec un saut au mois de juin (Sultan et Janicot, 2003). Par ailleurs, les *Prr* de la saison AMJ du littoral ivoirien sont plus importantes que celles des autres localités. Cela révèle que cette période est plus pluvieuse et donc plus sujet à une récurrente des inondations au cours de ces dernières décennies sur le littoral ivoirien. A cet effet, Konaté et al. (2016) et Diarrassouba et al. (2022) ont souligné que les villes d'Abidjan et de San-Pédro sont exposées aux risques d'inondation. Cette catastrophe apparaît le plus souvent au cours de la période AMJ qui concentre plus de 50% des cumuls pluviométriques annuels du littoral (Coulibaly et al., 2019a). Les risques d'inondation augmentent lorsque les pluies continuent sur plus de deux jours. Partant, les résultats issus du processus des chaînes de Markov d'ordre 2 illustrés dans les figures 2 et 3 indiquent les probabilités des jours pluvieux selon l'état des deux jours précédents.



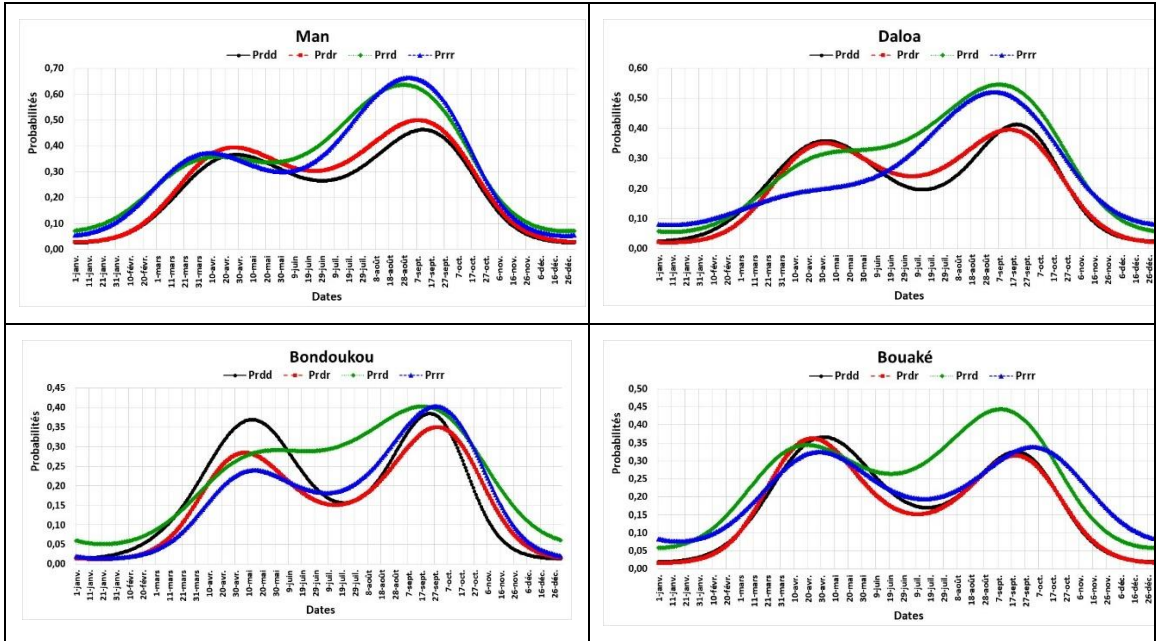
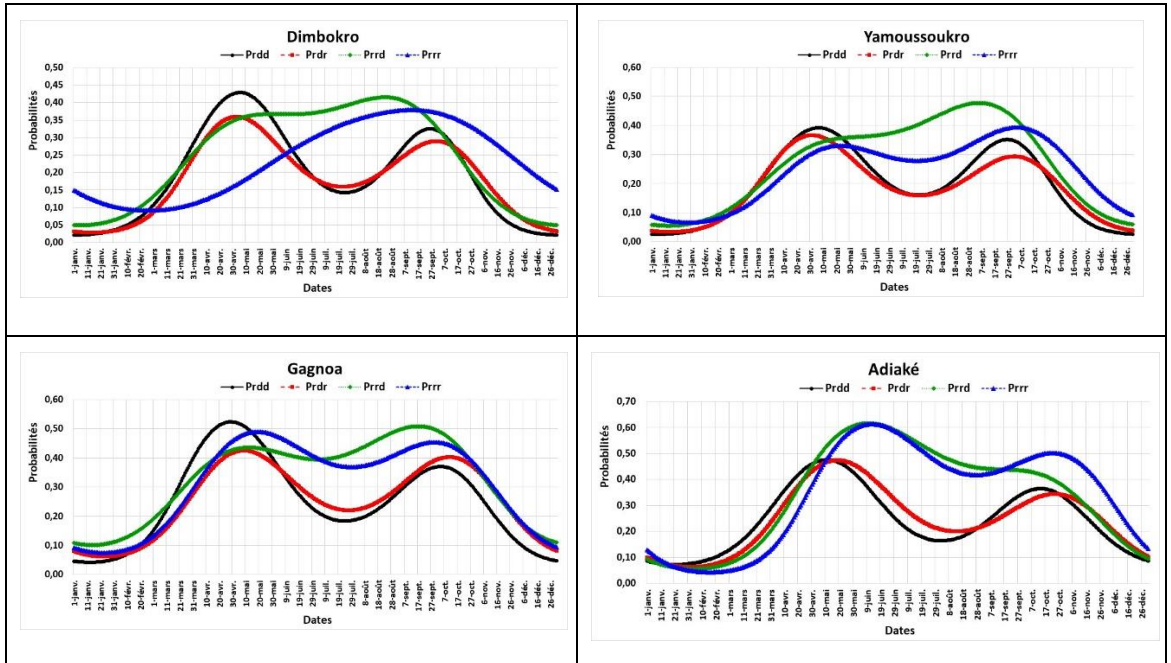


Figure 2. Evolution des probabilités journalières des jours pluvieux selon les chaînes de Markov d'ordre 2 dans les localités du nord, ouest et sud de la Côte d'Ivoire



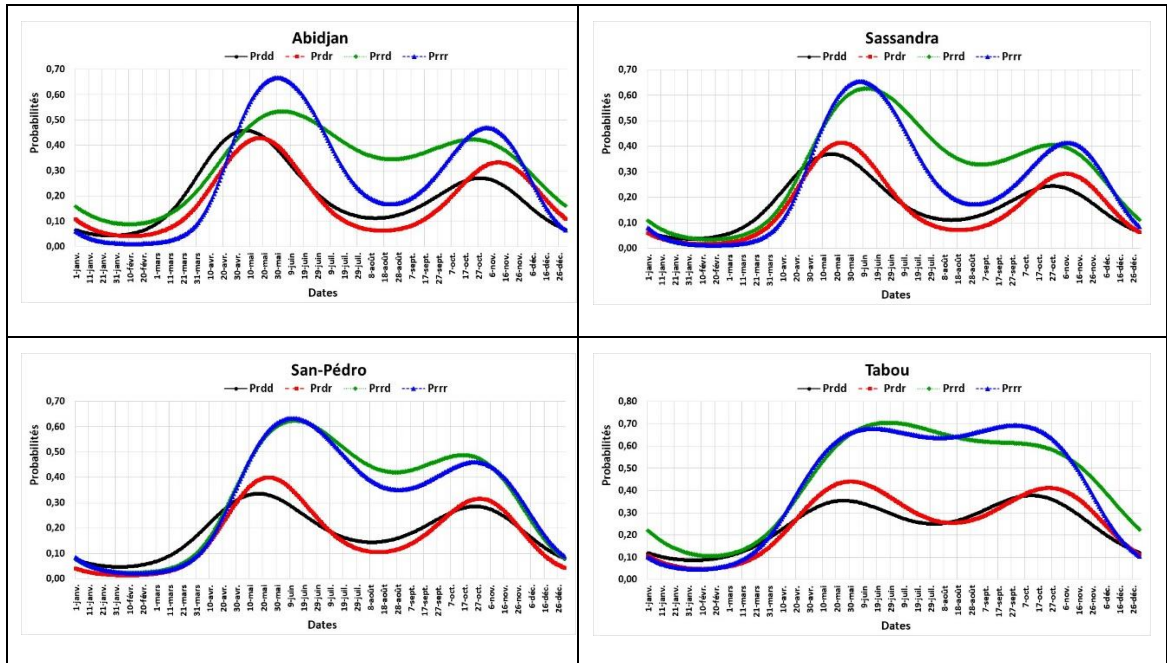


Figure 3. Evolution des probabilités journalières de pluie selon les chaînes de Markov d'ordre 2 au sud et littoral de la Côte d'Ivoire

Dans le nord ivoirien (Korhogo et Odienné), en pleine période pluvieuse (JAS), les probabilités des jours pluvieux varient en moyenne entre 0,40 à 0,70 quelle que soit l'état des jours précédents. En général, les probabilités sont relativement identiques même si celles sachant que les deux jours précédents étaient secs (*Prdd*) sont légèrement supérieures aux *Prdr*, *Prrd* et *Prrr*. Cela démontre que les probabilités de jour pluvieux sont indépendantes de l'état des deux jours précédents. Ceci explique le caractère aléatoire des jours pluvieux au nord de la Côte d'Ivoire où le régime pluviométrique est unimodal. Cette situation accentue la baisse des jours de pluie et par conséquent des quantités pluviométriques annuelles. Ce résultat est conforme à celui de Coulibaly et al. (2019b) qui ont montré une baisse des nombres de jour de pluie en relation avec les cumuls pluviométriques saisonniers en Côte d'Ivoire et particulièrement au Nord sur la période allant de 1951 à 2017.

A Man (Ouest de la Côte d'Ivoire) et dans les localités du centre, sud et littoral ivoiriens, les *Prrd* et *Prrr* sont supérieures aux *Prdd* et *Prdr* avec un écart très important sur les localités du littoral. En moyenne, les *Prrd* et *Prrr* oscillent entre 0,31 et 0,38 pour la première saison des pluies (AMJ) et entre 0,32 à 0,42 pour la deuxième (SON) au Centre et Sud. Celles du littoral ivoirien sont en moyenne de 0,49 pour la période AMJ et de 0,54 pour SON. Ces résultats indiquent qu'il y a plus de chance qu'il pleuve

après au moins un jour pluvieux au centre, sud et littoral de la Côte d'Ivoire.

En somme, les probabilités des jours pluvieux selon les chaînes de Markov d'ordre 2 sont supérieures à celles d'ordre 1. Cela indique qu'en Côte d'Ivoire, il y a plus de chance qu'il pleuve connaissant l'état des deux jours précédents. Par ailleurs, les probabilités de jour pluvieux sont plus élevées au nord et sur le littoral que dans le centre et le sud ivoiriens. En regardant les deux jours précédents, il est plus probable qu'il pleuve après deux jours secs dans le Nord ivoirien à régime pluviométrique unimodal alors qu'au centre, sud et le littoral à régime bimodal, c'est plutôt si le précédent ou les deux jours précédents sont pluvieux. Ainsi, l'analyse des probabilités des jours pluvieux selon les chaînes de Markov montrent que les localités peuvent être regroupées en trois zones qui varient selon les latitudes en Côte d'Ivoire : fortes probabilités au Nord et sur le littoral, et faibles au Centre et au Sud. Ces variations des probabilités s'alignent à des régimes pluviométriques en Côte d'Ivoire. Ces résultats sont similaires à ceux de Samba et Mpounza (2005) qui ont montré que les valeurs des probabilités des jours pluvieux selon le caractère de la veille opposent deux domaines principaux à savoir le Sud (tropical humide) et le Nord (équatorial).

Les chaînes de Markov ont montré les probabilités de pluie sachant l'état d'un ou deux jours précédents. Ces probabilités sont élevées pendant les saisons pluvieuses. Ainsi, les fortes pluies qui en résultent sur des jours continus peuvent être à l'origine de risque d'inondation en Côte d'Ivoire. C'est pour cela qu'une analyse fréquentielle des pluies maximales sur trois jours consécutifs pendant les saisons pluvieuses est nécessaire.

Fréquences des pluies maximales sur trois jours consécutifs

Le tableau 3 présente les statistiques des pluies maximales sur trois jours continus pour les différentes saisons pluvieuses en Côte d'Ivoire. La quantité de pluie cumulée la plus élevée sur les trois jours et la date de son observation sont également mentionnées.

Tableau 3. Statistiques des pluies maximales sur trois jours consécutifs en Côte d'Ivoire

Zone	Localité	Avril-Mai-juin (AMJ)		Juillet-Août-Septembre (JAS)		Septembre-Octobre- Novembre (SON)	
		Taux d'année (%)	Pluie maximale Date	Taux d'année (%)	Pluie maximale Date	Taux d'année (%)	Pluie maximale Date
Nord et Ouest	Korhogo	17,6	109,2 mm 11 avril 1998	74,5	217,3 mm 16 août 2014	23,5	152,7 mm 10 septembre 1986
	Odienné	11,5	145,6 mm 13 mai 1978	84,6	189,8 mm 06 août 1982	9,6	140,2 mm 13 septembre 1975
	Man	28,8	177,3 mm 10 avril 1994	65,4	200,2 mm 25 septembre	30,8	200,2 mm 25 septembre

					2013		2013
Centre	Bondoukou	40,4	153,6 mm 22 mai 2022	40,4	191,5 mm 16 septembre 2021	26,9	191,5 mm 16 septembre 2021
	Bouaké	38,5	163,6 mm 03 juin 1972	36,5	159,3 mm 24 août 2018	23,1	142,3 mm 09 octobre 2016
	Daloa	26,9	138,5 mm 19 juin 2018	58,3	172,8 mm 24 août 1973	26,9	136,1 mm 08 octobre 1995
Sud	Dimbokro	57,7	151,9 mm 25 mai 1991	21,2	120,7 mm 26 septembre 2021	25,0	149,2 mm 11 octobre 1994
	Yamoussoukro	47,9	159,6 mm 04 mai 1995	33,3	165,8 mm 27 septembre 2005	29,2	165,8 mm 27 septembre 2005
	Gagnoa	48,1	163,6 1 ^{er} mai 2014	30,8	164,4 mm 22 juillet 2007	32,7	147,9 26 septembre 2005
Littoral	Adiaké	69,2	381,2 mm 05 juin 1997	23,1	268,9 mm 08 juillet 2022	9,6	235,6 mm 05 octobre 2007
	Abidjan	73,1	337,4 mm 20 juin 1983	17,3	280,7 mm 05 juillet 1975	13,5	266,9 mm 24 octobre 1992
	Sassandra	76,9	570,4 mm 13 juin 2017	9,6	240 mm 09 juillet 1989	11,5	180,1 mm 10 octobre 1993
	San-Pédro	67,3	303,4 mm 29 mai 1982	9,6	275,8 mm 06 juillet 1989	9,6	228,2 mm 28 octobre 1987
	Tabou	61,5	422,3 mm 25 mai 1983	28,8	469,7 mm 06 juillet 1984	17,3	247,9 mm 27 septembre 2008

Valeurs en gras = taux d'années le plus élevé par localité

Au nord et à l'ouest de la Côte d'Ivoire, la période JAS enregistre le plus d'années où les pluies extrêmes sont observées. Le taux d'occurrence varie entre 64,4 et 84,6%. Les plus fortes pluies de 189 à 217 mm sont enregistrées entre juillet et septembre. Les périodes AMJ et SON enregistrent moins d'années ayant observées des pluies extrêmes. Les taux varient respectivement entre 11,5 et 28,8% et entre 9,6 et 30,8%.

Dans le centre et le sud ivoiriens, les pluies maximales sont observées sur les périodes AMJ, JAS et SON. Le taux d'années de pluie maximale pour AMJ varie entre 26,9 et 57,7%, alors qu'il est de 21,2 à 58,3% pour JAS et de 23,1 à 32,7% pendant la période SON. Les pluies maximales oscillent entre 120,7 et 191,5 mm et s'observent en mai-juin ou en août-septembre, et quelque fois en octobre. Ainsi, au centre et sud de la Côte d'Ivoire, les excès pluviométriques occasionnant des risques d'inondation surviennent entre avril et novembre avec une fréquence élevée pendant les mois de mai, juin, août et septembre.

Sur le littoral de la Côte d'Ivoire, AMJ concentre entre 60 et 77% des événements pluvieux extrêmes pouvant atteindre 300 à 570 mm en au moins sur trois jours consécutifs pendant les mois de mai-juin. Il faut noter que JAS

et SON enregistrent également de fortes pluies entre 180 et 469 mm en juillet ou octobre bien que le taux d'années d'évènements extrêmes soit faible et inférieur à 29%. Malgré le fort taux d'années à pluie maximale enregistrée en AMJ, le risque d'inondation couvre les périodes allant d'avril à novembre.

Il ressort de cette analyse qu'au nord et à l'ouest de la Côte d'Ivoire, les pluies maximales sur trois jours continus s'observent en JAS avec le pic en août-septembre. Dans le centre et le sud, les pluies maximales sont récurrentes de mai à octobre alors que sur le littoral, AMJ enregistre le plus d'évènements pluvieux avec une extension de l'occurrence en juillet, septembre et octobre. Il faut noter que les pluies maximales sur trois jours continus observées pendant les périodes pluvieuses sont apparues dans la plupart des cas après les années 1990. Ainsi, cela concerne 64% des localités pendant AMJ, 57% en JAS et 71% en SON. Ces résultats corroborent ceux du GIEC (2014) qui a indiqué qu'avec le réchauffement climatique, les extrêmes climatiques telles que les inondations et les sécheresses vont se multiplier et devenir plus violents.

A l'échelle de la Côte d'Ivoire, les plus fortes pluies maximales journalières sont observées sur le littoral ivoirien entre avril-mai-juin par rapport au nord-ouest, centre et sud. Ce qui fait que les localités du littoral sont plus vulnérables aux risques d'inondation même si aucune région de la Côte d'Ivoire n'est exempte de cette catastrophe. Soro et al. (2016) ont corroboré ce résultat en indiquant que les pluies journalières centennales et décennales avec les plus fortes valeurs se trouvent surtout sur le littoral, dans la zone montagneuse à l'extrême ouest, et au centre-ouest de la Côte d'Ivoire. Les quantités de pluie de plus de 100 mm accentue le risque d'inondation en Côte d'Ivoire. La détermination de la durée de retour de ces quantités de pluie maximale est importante pour connaître leur qualification.

Durées de retour des pluies maximales journalières

Les durées de retour des pluies maximales journalières en Côte d'Ivoire sont calculées. Les quantités quotidiennes pour chaque période de retour sont illustrées dans le tableau 4.

Tableau 4. Quantités de pluie maximale journalière et leur durée de retour en Côte d'Ivoire

Zone	Localité	Durée de retour et caractérisation des pluies extrêmes journalières (mm)								
		Normale		Anormale		Très anormale		Exceptionnelle		Très exceptionnel
		2 ans	6 ans	7 ans	10 ans	11 ans	30 ans	31 ans	100 ans	101 ans
Nord et Ouest	Korhogo	68,8	94,6	97,8	105,2	107,1	127,1	127,8	150,6	150,8
	Odienné	69,5	93,1	96,1	102,8	104,6	122,8	123,4	144,3	144,5
	Man	78,4	102,5	105,6	112,4	114,2	132,9	133,5	154,9	155,0
Centre	Bondoukou	70,1	97,3	100,8	108,5	110,6	131,7	132,4	156,5	156,7
	Bouaké	68,3	89,5	92,2	98,2	99,8	116,3	116,8	135,6	135,8
	Daloa	77,3	99,3	102,1	108,4	110,0	127,1	127,6	147,1	147,3
Sud	Dimbokro	72,8	94,7	97,4	103,7	105,3	122,2	122,8	142,1	142,3
	Yamoussoukro	75,8	98,7	101,6	108,1	109,8	127,6	128,1	148,4	148,6
	Gagnoa	77,8	105,1	108,5	116,3	118,3	139,5	140,1	164,3	164,5
Littoral	Adiaké	116,9	165,9	172,0	186,0	189,7	227,5	228,8	272,1	272,5
	Abidjan	124,0	168,4	174,0	186,6	189,9	224,3	225,4	264,6	265,0
	Sassandra	113,3	162,0	168,1	182,0	185,7	223,4	224,7	267,8	268,2
	San-Pédro	116,2	151,7	156,2	166,3	169,0	196,5	197,4	228,9	229,2
	Tabou	153,4	208,8	215,7	231,5	235,7	278,6	279,9	329,0	329,4

L'analyse des durées de retour montre que les quantités de pluie maximale journalière inférieure à 100 mm sont normales au nord, au centre et au sud de la Côte d'Ivoire. Leurs durées de retour sont moins de six ans. Les quantités de pluie supérieures à 100 mm ont une durée de retour moyenne de sept à 10 ans et sont qualifiées de pluies anormales. Les pluies deviennent exceptionnelles lorsqu'elles dépassent en moyenne 110 à 120 mm sauf à Man et Gagnoa où les seuils se situent respectivement à environ 130 à 140 mm. Selon Boko et al. (2013), les enregistrements du Bureau de la coordination des affaires humanitaires des Nations Unies (OCHA) indiquent des cas d'inondation dans le nord de la Côte d'Ivoire, notamment à Korhogo en 2006 et 2007 où de nombreux dégâts matériels et humains, ainsi que des destructions d'infrastructures routières ont été signalés. Il faut cependant noter que les quantités de pluie maximale journalière sur trois jours consécutifs observées à la station synoptique de Korhogo étaient de 55,9 mm le 23 septembre 2006 et de 58,6 mm le 23 juillet 2007. Ainsi, ce sont des pluies normales avec une durée de retour inférieure à 6 ans qui ont causées ces dégâts en 2006 et 2007.

Sur le littoral ivoirien, les quantités de pluie sont élevées. Seules, les valeurs de plus de 220 mm sont considérées comme des pluies exceptionnelles sauf à San-Pédro où le seuil est d'environ 197 mm. Les quantités de pluie enregistrées dans les communes du District Autonome d'Abidjan le 19 juin 2018 ont fait de nombreux dégâts matériels et humains

(Rapport de l'Office National de la Protection Civile ; RCI, 2019). Ces cumuls pluviométriques ont varié entre 130 et 302 mm selon les enregistrements de la Direction de la Meteorologie Nationale de Côte d'Ivoire. Partant, ce sont des pluies normales. Seule, la quantité de 302 mm enregistrée dans la commune de Cocody a été très exceptionnelle avec une durée de retour de plus de 100 ans. De plus, au cours de ces dernières décennies, les cas d'inondation enregistrés en Côte d'Ivoire, notamment à Abidjan, Aboisso, San-Pedro, Bouaké et Toulepleu, sont survenues avec des pluies journalières inférieures à 150 mm. Sur le littoral, ce sont des pluies normales car les durées de retour restent inférieures à six ans. Ce résultat est en conformité avec celui de Kouassi et al. (2021) qui ont montré que le seuil de pluie normal dans le bassin de la Bia au sud-est de la Côte d'Ivoire est de 103 mm malgré les cas d'inondation enregistrés dans la région entre 2001 et 2015. De plus, ces auteurs ont utilisé des données de 1941 à 2000. Par conséquent, la présente étude allant de 1971 à 2022 est une actualisation des études antérieures.

Il ressort donc que les inondations qui surviennent en Côte d'Ivoire ont pour cause des pluies pour la plupart normales ou anormales avec quelques rares fois exceptionnelles. Partant, les risques d'inondation en Côte d'Ivoire ne sont pas le fait seulement d'excès pluviométrique. Des facteurs environnementaux et humains comme l'occupation du sol (constructions anarchiques), la topographie, l'obstruction des voies d'eau pluviale peuvent également être des causes. Hangnon et al. (2015) ont abouti à des conclusions similaires à Ouagadougou (Burkina Faso) en indiquant que l'urbanisation mal maîtrisée et l'accroissement de la population augmentent la vulnérabilité de la ville aux risques d'inondation.

Conclusion

Cette étude a permis à travers l'utilisation de méthodes statistiques d'analyse des pluies journalières d'établir une forte corrélation entre la persistance des séquences pluvieuses et les risques d'excès pluviométrique qui sont souvent à la base des risques d'inondation en Côte d'Ivoire. En effet, pendant les saisons des pluies, la probabilité pour qu'il pleuve est liée à l'état d'un ou deux jours précédents. Cette probabilité est plus importante au Nord et sur le littoral qu'au Centre et au Sud. Les pluies normales à durée de retour faible, c'est-à-dire inférieures à six ans, occasionnent des risques d'inondation pendant les saisons pluvieuses en Côte d'Ivoire. Les périodes avril-mai-juin, Juillet-aout-septembre et septembre-octobre-novembre concentrent les pluies extrêmes journalières respectivement au nord, ouest, centre, sud et le littoral de la Côte d'Ivoire.

Remerciements: Les auteurs remercient sincèrement la Société d'EXploitation et de développement Aéroportuaire aéronautique et Météorologique (SODEXAM)/ Direction de la Météorologie Nationale de Côte d'Ivoire pour la mise à disposition des données pluviométriques journalières.

Déclaration de financement: Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour la réalisation de cette recherche.

Conflit d'intérêts: Les auteurs signalent qu'il n'y a aucun conflit d'intérêts pour cette étude.

References:

1. Allé C. S. U. Y., Afouda A. A., Agbossou K. E., & Guibert H. (2013). Évolution des Descripteurs Intrasaisonniers des Saisons Pluvieuses Au sud-Bénin Entre 1951 et 2010. *American Journal of Scientific Research*, Issue 94 November, 2013, pp. 55-68.
2. Boko K. N., Cissé G., Koné B., & Dedy S. (2013). Variabilité climatique et changements dans l'environnement à Korhogo en Côte d'Ivoire : mythes ou réalité? *Conférence internationale Africa 2013 sur l'Ecosanté*, 15 pages.
3. Coulibaly K. A., Dibi-Kangah P. A., Djè K. B., & Koli B. Z. (2019a). Détection de structures pluviométriques spatio-temporelles homogènes en Côte d'Ivoire sur la période 1951-2017. *Revue de Géographie, d'Aménagement Régional et de développement des Suds (Regardsuds)*. Abidjan, Côte d'Ivoire, pp. 49-64.
4. Coulibaly K. A., Dibi-Kangah P. A., & Koli B. Z. (2019b). Variations interannuelles récentes des paramètres climatiques majeurs en Côte d'Ivoire depuis 1951. *Climat et Développement*, N°26, Cotonou, Bénin, pp. 5-16.
5. Diarrassouba B., Yapi A. C., & Kouadio W. A. (2022). Occupation des Zones à Risques à San-Pedro (Côte D'ivoire): Entre Laxisme des Autorités et Insouciance des Populations. *European Scientific Journal (ESJ)*, 18 (26), pp. 46-69. <https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n26p46>.
6. GIEC, Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R. K. Pachauri et L. A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 pages.

7. Hangnon H., De Longueville F., & Ozer P. (2015). Précipitations 'extrêmes' et inondations à Ouagadougou : quand le développement urbain est mal maîtrisé. *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 1-4 juillet 2015, Liège, pp. 497-502.
8. INS-RGPH, Institut National de la Statistique-Recensement Général de la Population et de l'Habitat (2021). *RGPH 2021-Résultats globaux*, Abidjan, Côte d'Ivoire, 37 p.
9. ISDR, Stratégie Internationale de Prévention des Catastrophes (2011). *Stratégie Nationale de Gestion des Risques de Catastrophes & Plan d'Action, Côte d'Ivoire*. Version finale, octobre 2011, 65 p.
10. Konaté L., Kouadio B. H., Djè B. K., Aké G. E., N'guessan B. V. H., Gnagne L., Kouamé M. K., & Biémi J. (2016). Caractérisation des pluies journalières intenses et récurrences des inondations: apport des totaux glissants trois (3) jours à la détermination d'une quantité seuil d'inondation (District d'Abidjan au Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 17 No. 3 Aug. 2016, pp. 990-1003.
11. Kouassi A. M., Nassa R. A.-K., Yao K. B., Kouamé K. F., & Biémi J. (2018). Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 31(2), pp. 147-160. <https://doi.org/10.7202/1051697ar>.
12. Kouassi K. M., Meledje N. H., Ahoussi K. E., Kouassi K. L., Koffi Y. B., Oga Y. M. S., Biémi J., & Soro N. (2021). Nature des événements pluviométriques sur le bassin versant de la rivière Bia en Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 34 No 1, Oct. 2021, pp. 1-6.
13. Meddi H., & Meddi M. (2009). Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, vol. 20, n° 1, janvier-février-mars 2009, pp. 57-65.
14. Meledje N. H., Kouassi K. L., N'go Y. A., & Savané I. (2015). Caractérisation des occurrences de sécheresse dans le bassin hydrologique de la Bia transfrontalier entre la Côte d'Ivoire et le Ghana : contribution des chaînes de Markov. *Cah Agric*, Vol. 24, pp. 186-197. doi : 10.1684/agr.2015.0755.
15. Ndabalishye I. (1995). *Agriculture vivrière ouest-africaine à travers le cas de la Côte d'Ivoire*. IDESA, Abidjan, Côte d'Ivoire, 383 p.
16. RCI, République de Côte d'Ivoire (2019). *Évaluation des pertes, dommages et besoins suite aux inondations de juin 2018 à Abidjan*. Cote d'Ivoire, Abidjan, Avril 2019, 220 p.
17. Redelsperger J.-L., Diedhiou A., Flamant C., Janicot S., Lafore J.-P., Lebel T., Polcher J., Bourles B., Caniaux G., De Rosnay P., Desbois

- M., Eymard L., Fontaine B., Geneau I., Ginoux K., Hoepffner M., Kane C., Law K., Mari C., Marticorena B., Mougou E., Pelon J., Peugeot C., Protat A., Roux F., Sultan B., & Van Den A. E. (2006). Amma, une étude multidisciplinaire de la mousson ouest-africaine. *La Météorologie* - n° 54 - août 2006, pp. 22-32.
18. Samba G., & Mpounza M. (2005). Application du processus de Markov sur les occurrences des précipitations journalières au Congo-Brazzaville. *Comptes Rendus Geoscience*, Volume 337, Issue 15, pp. 1355-1364.
19. Soro G. E., Dao A., Fadika V., Goula B. T. A., & Srohorou B. (2016). Estimation des pluies journalières extrêmes supérieures à un seuil en climat tropical : cas de la Côte d'Ivoire. *Physio-Géo* (En ligne), Volume 10, mis en ligne le 19 août 2016, consulté le 15 septembre.
20. Sultan B., & Janicot S. (2003). The West African monsoon dynamics. Part II: The pre-onset and the onset of the summer monsoon. *J. Climate*, 16, 3407-3427