International Journal of Innovation and Applied Studies
ISSN 2028-9324 Vol. 46 No. 3 Sep. 2025, pp. 434-446
© 2025 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijias.issr-journals.org/

Analyse de l'occurrence des extrêmes climatiques et cartographie des risques hydro climatiques dans la zone agro écologique 4 du Bénin

[Analysis of the Occurrence of Climate Extremes and Mapping of Hydro-Climatic Risks in Agro-Ecological Zone 4 of Benin]

Ouinakonhan Médard[1], F. Avahounlin Ringo[1-2], and W. Vissin Expédit[3]

[1]Chaire Internationale de Physique Mathématique et Applications (CIPMA CHAIRE-UNESCO, FAST, UAC), Benin

[2]Ecole Normale Supérieure (ENS, UNSTIM), Benin

[3]Université d'Abomey-Calavi, UAC, Benin

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Planet Earth is severely threatened by natural disasters whose impacts significantly affect the environment, human populations, and socio-economic activities (FFA, 2015). The aim of this study is to analyze the occurrence of extreme rainfall events and the risks of flooding and drought in Agroecological Zone 4 of Benin. The data used in this research include climatological data (daily rainfall and temperature series) as well as planimetric data (geological and pedological maps at a 1: 200,000 scale, land use data, and a Digital Elevation Model). The climatic data were used to calculate climate extreme indices and determine their occurrence using statistical frequency analysis. Flood and drought risk mapping was carried out using a Geographic Information System (GIS), by coding and combining the contributing factors through an index-based mapping method. The results of this study show that extreme rainfall events with return periods ranging from 50 to 100 years are mainly driven by an increase in precipitation events exceeding 20 mm and maximum rainfall recorded over five consecutive days. The flood risk map reveals that high and very high flood risk zones represent 22.37% and 15.24% of the study area, respectively, and are mainly located in the immediate vicinity of watercourses. Regarding drought risk, the mapping indicates that low and moderate risk zones cover 27.10% and 19.44% of the study area, while high and very high risk zones account for 35.75% and 17.70% of the territory, respectively.

KEYWORDS: occurrence, climate extremes, flooding, drought, Agroecological Zone 4.

RESUME: La planète Terre est gravement menacée par des catastrophes naturelles dont les manifestations ont un impact significatif sur l'environnement, les populations humaines et les activités socio-économiques (FFA, 2015). L'objectif de cette étude est d'analyser l'occurrence des événements climatiques extrêmes liés à la pluviométrie ainsi que les risques d'inondation et de sécheresse dans la zone agro écologique 4 du Bénin. Les données utilisées dans le cadre de cette recherche comprennent des données climatologiques (séries journalières de précipitations et de températures) ainsi que des données planimétriques (géologiques, pédologiques à l'échelle 1/200 000, occupation des sols et un Modèle Numérique de Terrain). Les données climatiques ont permis de calculer des indices d'extrêmes climatiques et de déterminer leur occurrence en s'appuyant sur une méthode statistique d'analyse fréquentielle. La cartographie des zones à risque d'inondation et de sécheresse a été réalisée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG), en combinant et en codifiant les facteurs responsables de ces phénomènes selon la méthode de cartographie par indice. Les résultats de cette étude montrent que les événements pluviométriques extrêmes dont les périodes de retour varient entre 50 et 100 ans sont principalement dus à l'augmentation des épisodes de précipitations supérieures à 20 mm ainsi qu'aux pluies maximales enregistrées sur cinq jours consécutifs. La cartographie des risques d'inondation révèle que les zones à risque élevé et très élevé couvrent respectivement 22,37 % et

Corresponding Author: F. Avahounlin Ringo

15,24 % de la zone étudiée, ces dernières étant principalement situées à proximité immédiate des cours d'eau. En ce qui concerne le risque de sécheresse, la cartographie indique que les zones à risque faible et moyen occupent respectivement 27,10 % et 19,44 % de la superficie totale, tandis que les zones à risque élevé et très élevé représentent 35,75 % et 17,70 % du territoire étudié.

MOTS-CLEFS: occurrence, extrêmes climatiques, inondation, sécheresse, zone agro écologique 4.

1 INTRODUCTION

La planète terre est intensément menacées par des catastrophes naturelles dont les manifestations impactent fortement l'environnement, l'homme et les activités socio-économiques (FFA, 2015). En effet, les phénomènes liés au temps, au climat et à l'eau sont à l'origine de 90 % des catastrophes naturelles dont les coûts très exorbitants ont atteint un record avec plus de 400 milliards de dollars pour les désastres météorologiques ayant pu être estimés en 2017 (OAA, 2017). Pour certains aléas, le contexte de changement climatique pourrait se traduire par une recrudescence des événements extrêmes ou des impacts accrus, en termes de risques pour les populations et les activités économiques exposées, de santé et de fragilisation des écosystèmes. Cela concernerait les vagues de chaleur, certains types de sécheresses, les précipitations intenses dans certaines régions, les aléas gravitaires qui leur sont souvent associées en zone de relief (glissements de terrain, laves torrentielles, avalanches, etc.), les cyclones les plus intenses et la hausse du niveau des mers. L'objectif de cette étude est d'analyser l'occurrence des événements extrêmes pluviométriques et les risques d'inondation et de sécheresse dans la zone agroécologique 4 du Bénin.

2 CADRE D'ETUDE

D'une superficie de 16936 $km^{2,}$ la zone agro écologique 4 du Bénin s'étend sur deux départements (Atacora et Donga) et couvre neuf communes dont Cobly, Ouaké, Boukoumbé, Tanguiéta, Natitingou, Djougou, Toucountouna et Copargo (RGPH4, 2013). Elle est située entre 10° et 10°40' de latitude Nord et 0°75' et 1°30' de Longitude Est (figure 1). La pluie constitue le facteur déterminant du climat dans la zone intertropicale. Et le climat est de type atacorien (Houssou, 1998) et caractérisé par un régime de type unimodal avec deux saisons (une saison pluvieuse et une saison sèche). La tendance pluviométrique générale présente des hauteurs de pluies moyennes de 1400 mm d'eau réparties en 90 jours (Tenté, 2005). La grande saison des pluies couvre la période d'avril à octobre et la grande saison sèche couvre la période de novembre à mars. Les hauteurs de pluie sont abondantes au cours des mois d'août et de septembre.

Le régime moyen de la température maximale suit un rythme bimodal avec deux pics. Le premier en mars (37°C) et le second en novembre (35°C). Les deux pics sont dus à la forte radiation directe et à la faible nébulosité. Les plus faibles températures sont enregistrées en juillet et en août. Le régime moyen de la température minimale suit un régime unimodal avec un pic dans le mois d'avril (24°C). Les minimas sont enregistrés en novembre (18°C), décembre (18°C) et janvier (19°C). Les températures minimales et moyennes évoluent à la baisse contrairement à la température maximale sur la période d'observation. Les mois les plus chauds sur la période sont novembre, février, mars et avril.

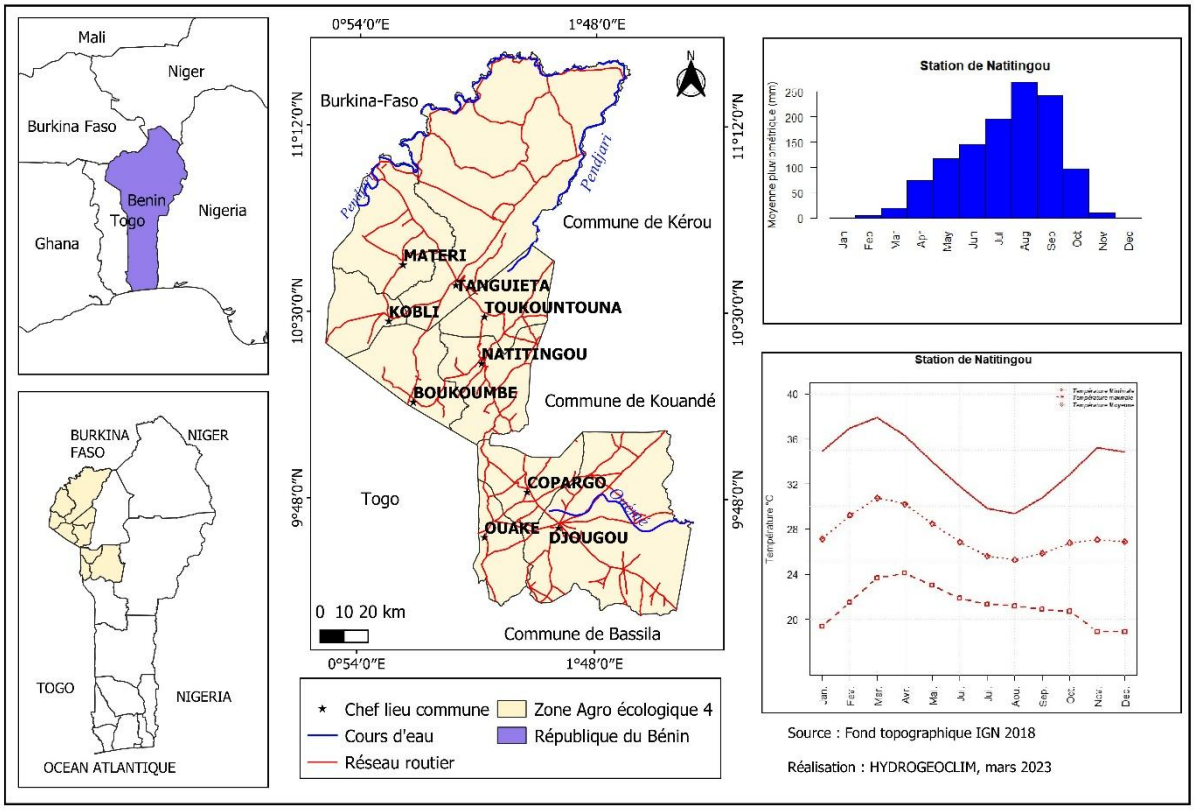

Fig. 1. Situation géographique de la zone agro écologique du Bénin et son régime climatique

3 METHODES D'ETUDE

3.1 DONNÉES D'ÉTUDE

Dans le cadre de cette étude, les données climatologiques et planimétriques ont été utilisées. Les données climatologiques sont constituées des séries journalières de pluies et de température extraites de la base de données de l'Agence de la Météorologie Nationale (Météo Bénin) au niveau de la station synoptique de Natitingou et des postes pluviométriques situés dans la zone Agroécologique 4 et sur la période 1970-2017. Les données planimétriques sont issues de la base de données de l'Institut Géographique Nationale (IGN) et sont constituées des cartes géologiques, pédologique à l'échelle 1/200 000 et d'un Modèle Numérique du terrain (MNT). La carte géologique a été utilisé pour apprécier l'aptitude à l'infiltration des différentes couches géologiques. Le modèle numérique de terrain est issu du capteur Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 30m de résolution, il a servi de donnée de base pour l'extraction des données topographiques et a l'hydrographie qui sont: les formes du relief, les pentes, le réseau hydrographique. Les images satellites sont de type Landsat de la génération OLI 8 et 9 des scènes 192-53, 193-52 et 193-53 obtenues sur le site officiel de l'United States Geological Survey (USGS): https://earthexplorer.usgs.gov. Ces images ont permis d'identifier les différentes unités d'occupation du sol.

3.2 ANALYSE DES FREQUENCES DES INDICES CLIMATIQUES

Les méthodes d'analyse fréquentielle ont été appliquées à cinq indicateurs d'extrêmes pluviométriques. En effet un total de 27 indices de base a été suggéré par l'Equipe d'experts sur la détection d'indices du changement climatique (Expert Team on Climate Change Detection Indices ETCCDI). Les descriptions détaillées de ces indices et RClimDex sont disponibles sur le site web de l'ETCCDI (http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml). Cette étude a pris en compte les jours sec consécutifs (CDD), les jours humides consécutifs (CWD), le nombre de précipitation supérieur à 20 mm (R 20mm), la quantité maximale de pluie sur cinq jours (Rx5day) et l'indice d'intensité journalier simple (SDII) (tableau 1). Ainsi les différents indices ont été ajustés à la loi statistique GEV. La variabilité interannuelle des indices a été apprécié à partir de l'indice centré réduit (Eq1).

$$I = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma(x)} \quad (1)$$

Avec x_i: la valeur de la variable; $\bar{x}$: la moyenne de la série et $\sigma(x)$: écart type de la série.

Tableau 1. Indices d'extrêmes pluviométriques

Identifiant de l'indice	Nom de l'indicateur	Définitions	Unités
CDD	Jours secs consécutifs	Nombre maximum de jours consécutifs avec RR <1mm	Journées
CWD	Jours de pluie consécutifs	Nombre maximum de jours consécutifs avec RR> = 1mm	Journées
R20	Nombre de jours précipitations très intenses	Nombre annuel de jours lorsque PRCP> = 20mm	Journées
Rx5day	Quantité maximale de précipitations sur 5 jours	Précipitations mensuelles maximales consécutives sur 5 jours	mm
SDII	Indice d'intensité journalier simple	Total des précipitations annuelles divisé par le nombre de jours de pluie (défini comme PRCP> = 1,0 mm) dans l'année	Mm/jour

3.3 CARTOGRAPHIE DES ÉVÈNEMENTS D'EXTRÊMES CLIMATIQUES

Les inondations et la sécheresse ont été les deux évènements caractéristiques de risques hydroclimatiques cartographié au moyen de l'outil Raster calculator sous ArcGis. La cartographie du risque est liée à l'analyse de l'état de vulnérabilité du secteur au phénomène et la manifestation de l'aléa.

La cartographie du risque d'inondation est le produit de l'aléa et de la vulnérabilité (Gilard et Gendreau, 1998; Onna et *al.,* 2005). Elle est déterminée par cinq paramètres régit par l'équation Eq2 (Harding et al., 2001 et Henry 2006).

$$R = f(A, E, V, I, t, s) \quad (2)$$

Avec A= aléa, E= enjeu, V= vulnérabilité, I= résilience, t et s=dimensions spatio-temporelles.

La carte des aléas est obtenue par combinaison des cartes des isohyètes et de celle de la couverture du sol dont le croisement a permis de déterminer l'étendue spatiale et les zones potentiellement exposées aux aléas climatiques pouvant engendrer des inondations dans le secteur d'étude. Ainsi à partir des précipitations annuelles constituées et de la classification des unités d'occupation du sol, des classes d'abondance pluviométrique (faible: < 600 mm; moyen: 600 – 800 mm; forte: 800 – 1000 mm; très fort: >1000) et de couverture végétale (faible: forêt dense, semi-décidue, galerie forestière et plantation; moyen: forêt claire, savane arborée et arbustive, champs et jachères; fort: agglomérations, formations marécageuses et plan d'eau) ont été définies. La carte de vulnérabilité à l'inondation est obtenue par superposition de différentes cartes thématiques liées à la densité de drainage, à la lithologie et à la pente.

La reclassification et la codification de chaque carte thématique (tableau 2) et le croisement des différentes cartes suivant les critères d'analyses multicritère ont permis d'obtenir la carte du risque d'inondations. Les principales étapes de détermination du risque d'inondation sont résumées dans la figure 2.

Tableau 2. Critères et cote de reclassification des cartes thématiques pour la cartographie des risques d'inondation

Unité	Désignation	Niveau	Côte
Drainage	0-15,79	Faible	1
	15,79-31,59	Moyen	2
	31,59-47,39	Fort	3
	47,39-63,19	Très fort	4
Pente	0-2,64	Très fort	4
	2,641-7,392	Fort	3
	7,393-17,16	Moyen	2
	17,61-67,322	Faible	1
Lithologie	Granites Syntechtoniques Calco-alcalins ; Granites prostectoniques calco-alcalins ; Groupe de pira (migmatites)	Faible	1
	Groupe de Djougou (gneiss à muscovites) ; Groupe de Kouandé (orthogneiss à biotite) ; Groupe de Kandi (gneiss à biotites) ; Schistes de l'oti grès de Bombouaka ; séricitoschistes schistes micaschistes	Moyen	2
	Grès, grès quartzites, schistes ; Quartzites micaschistes ; Roche Basiques	Fort	3
Pluie	763,18-883,73	Faible	1
	883,73-971,55	Moyen	2
	971,55-1049,05	Fort	3
	1049,05-1202,14	Très fort	4
Occupation du sol	Foret danse ; foret claire et savane boisé	Faible	1
	Savane arboré et arbustive	Moyen	2
	Plantation	Fort	3
	Plan eau ; habitation	Très fort	4

FCSB: Forêt claire et savane boisée; FD: Forêt dense; SASa: Savane arborée et arbustive; FGFR: Forêt galerie et formation ripicole; FSM: Forêt et savane marécageuse; CJ: Culture et jachère; CJP: Culture et jachère sous palmier à huile; AG: Agglomération; PE: Plan d'eau

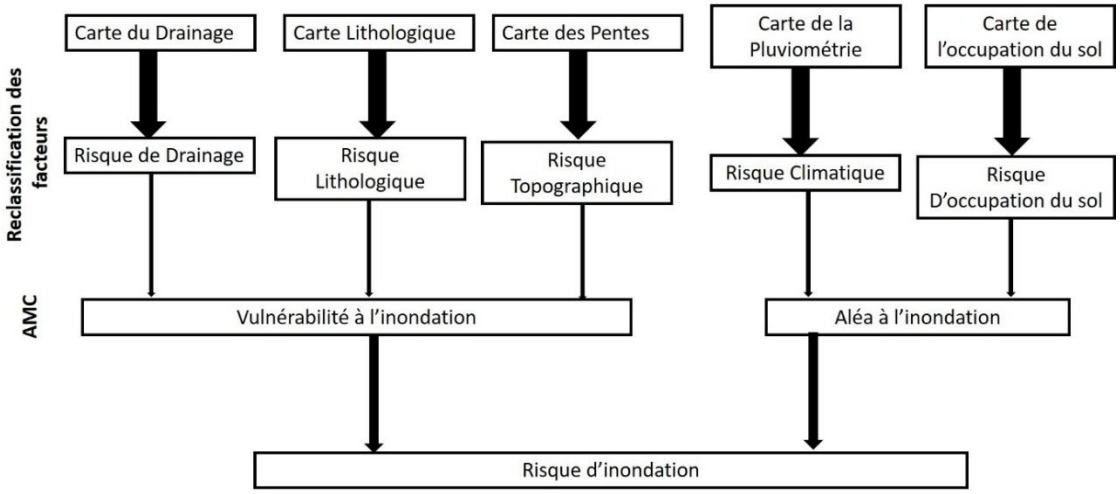

Fig. 2. Etapes méthodologiques de la cartographie du risque d'inondation

La cartographie du risque de sécheresse est la combinaison de l'aléa et la vulnérabilité à la sécheresse.

Sur la base des indices pluviométriques, un calcul des occurrences de sécheresse est effectué pour la réalisation de la carte des occurrences des années déficitaires en pluviométrie (tableau 3).

La carte de répartition spatiale des indices pluviométriques négatives a été croisée avec celle des occupations du sol pour obtenir la carte des aléas à la sécheresse (figure 3).

Tableau 3. Classification des indices standardisés des précipitations caractéristiques de sécheresse

Classeur de SPI	Grille d'interprétation
-1 < SPI < 0	Sécheresse Modérée
-2 < SPI < -1	Sécheresse Forte
SPI < -2	Sécheresse Extrême

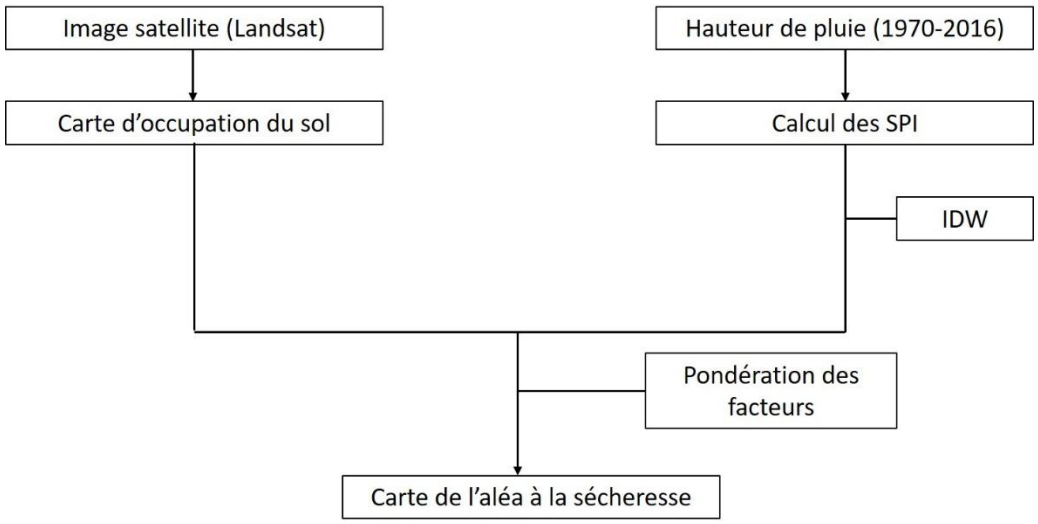

Fig. 3. Schéma représentatif du croisement des cartes pour l'obtention de l'aléa à la sécheresse

Les facteurs déterminant la sécheresse ont été calculés, classifiés et combinés pour déterminer la carte de vulnérabilité à la sécheresse (figure 4 et tableau 4). Il s'agit de la capacité de rétention d'eau du sol, la végétation (NDVI) et la température de surface du sol (Schaaf C. et al 2003; Ousma et al, 2006). Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) qui est construit à partir des bandes rouge NIR (proche de l'infrarouge) et RED (bande rouge) d'une image, exploite les caractéristiques en réflectance des végétaux, absorbent les longueurs d'ondes autour de 650 nm et réfléchissent plus ou moins celles dans le proche infrarouge. Le NDVI est défini par formule (Eq3):

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (3)$$

Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1. Les valeurs négatives correspondent aux surfaces autres que les végétaux (neige, eau, nuages), et les valeurs avoisinant 0 correspondent aux sols nus pour lesquels les réflectances dans le rouge et le proche infrarouge sont du même ordre de grandeur. Les formations végétales présentent des valeurs positives, proportionnelles à la densité du couvert et à l'activité chlorophyllienne. L'extraction de la température de surface du sol repose sur les données fournies par les bandes 4, 5, 10 et 11 de LANDSAT 8. Les données numériques infrarouges thermiques ont été converties en rayonnement spectral en utilisant le facteur de redimensionnement du rayonnement.

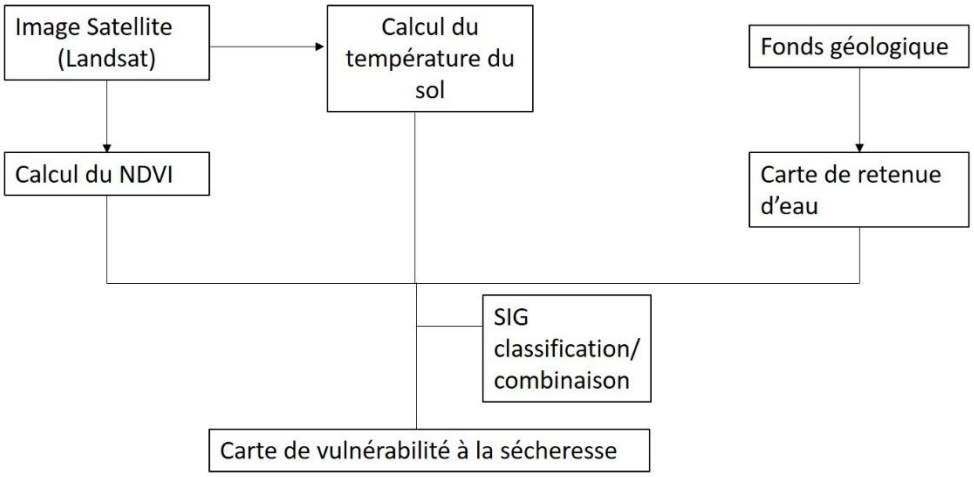

Fig. 4. Schéma représentatif du croisement des cartes pour l'obtention de la vulnérabilité à la sécheresse

Le tableau suivant présente les critères et côte de reclassification des cartes thématiques pour la cartographie du risque de sécheresse.

Tableau 4. Critères et cote de reclassification des cartes thématiques pour la cartographie des risques de sécheresse

Paramètres	Caractéristiques	Echelle descriptive	Côte
Occupation	Forêt Danse ; Forêt Claire et Savane Boisé ; Plan d'Eau	Faible	1
	Forêt Galerie et formation ripicole ; Savane Arbustive et Arboré	Moyen	2
	Plantation ; Habitation	Fort	3
Pluie	1092,53-1202,31	Faible	1
	982,75-1092,53	Moyen	2
	872,96-982,75	Fort	3
	763,186-872,96	Très Fort	4
Température du Sol	14,15-15,49	Faible	1
	15,49-15,90	Moyen	2
	15,90-16,94	Fort	3
	16,94-21,71	Très Fort	4
Indice normalisé de végétation	-0,10-0,09	Très Fort	4
	0,09-0,135	Fort	3
	0,135-0,172	Moyen	2
	0,172-0,43	Faible	1
Géologie	Granites Syntechtoniques Calco-alcalins ; Grès ; grès quartzites ; schistes ; séricitoschistes schistes micaschistes Groupe de pira (migmatites) ; groupe de Kouandé (orthogneiss à biotite) ; Groupe de Djougou (gneiss à muscovites) ; Granites prostectoniques calco-alcalins ; Schistes de l'oti grès de Bombouaka ; Groupe de Kandi (gneiss à biotites)	Moyen	2
	Quartzites micaschistes ; Roche Basiques	Faible	1

4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 VARIABILITE INTERANNUELLE DES INDICATEURS D'EXTREMES CLIMATIQUES

Les indices annuels des extrêmes des précipitations sont calculés pour les stations situées dans la zone Agroécologique 4. La figure 5 présente la variabilité interannuelle des précipitations annuelles et des indices climatiques d'extrêmes climatiques (CDD, CWD, R20mm, Rx5day et SDII).

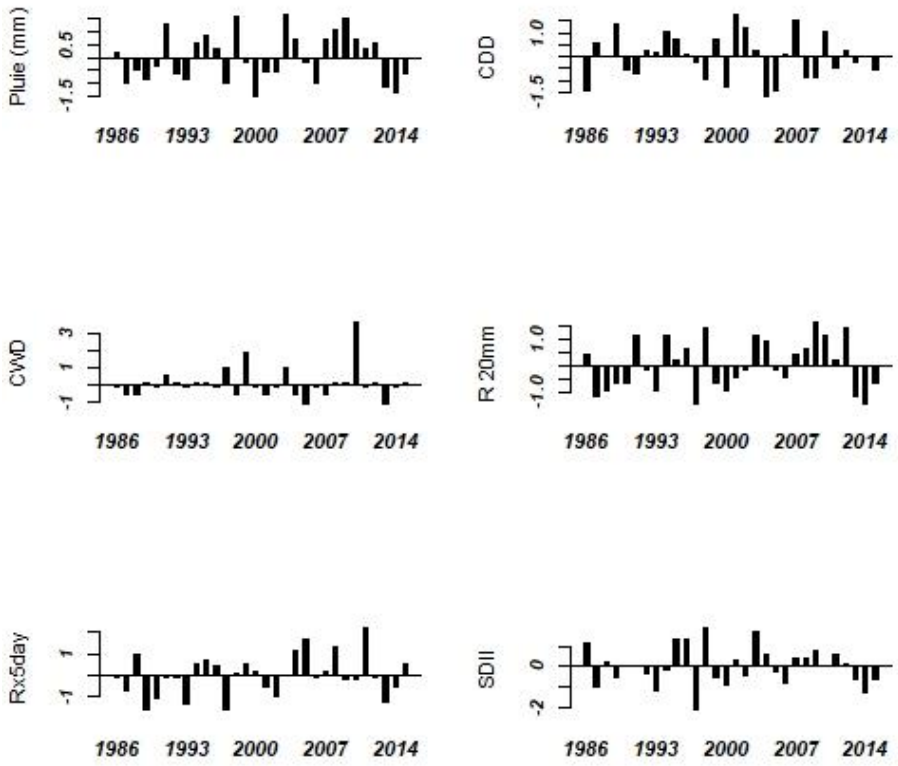

Fig. 5. Evolution interannuelle des précipitations annuelles et indices d'extrêmes climatiques

Il est constaté que les cumules annuels sont plus dominés par les anomalies négatives que positive. De plus nous constatons une segmentation dans la distribution temporelle des pluies. Cette segmentation scinde la série en deux parties la première caractériser par une alternance d'années sèche et humide (1986-2002). Une reprise des pluies est constatée avec une succession d'années arrosées (2003-2015). La récession pluviométrique observé sur la première segmentation s'explique par la baisse des jours humides consécutif au détriment des jours sec consécutif. Au cours de la seconde segmentation la reprise des pluies s'explique par la répercussion de l'augmentation du nombre de jour de pluie supérieur à 20 mm et la quantité maximale de pluie sur cinq jours. Le comportement de la pluie s'observe sur la lame d'eau écoulé dans le secteur d'étude. Une baisse de la lame d'eau est observée au cours de la période 1986-1995. Au cours de la période de 1996-2016 le secteur d'étude a connu une alternance d'années le fort écoulement et de faible écoulement avec plus d'année déficitaire qu'excédentaire.

4.2 OCCURRENCE DES INDICATEURS D'EXTRÊMES CLIMATIQUES

La méthode statistique d'analyse fréquentielle est appliquée aux différente indices CDD, CWD, R 20mm, Rx5day et SDII déterminé avec le modèle Rclimdex sur l'ensemble du secteur d'étude. La figure 6 et le tableau 5 présentent respectivement les courbes d'ajustement des séries constituées aux lois statistiques caractéristiques des évènements d'extrêmes climatiques et les quantiles des indices.

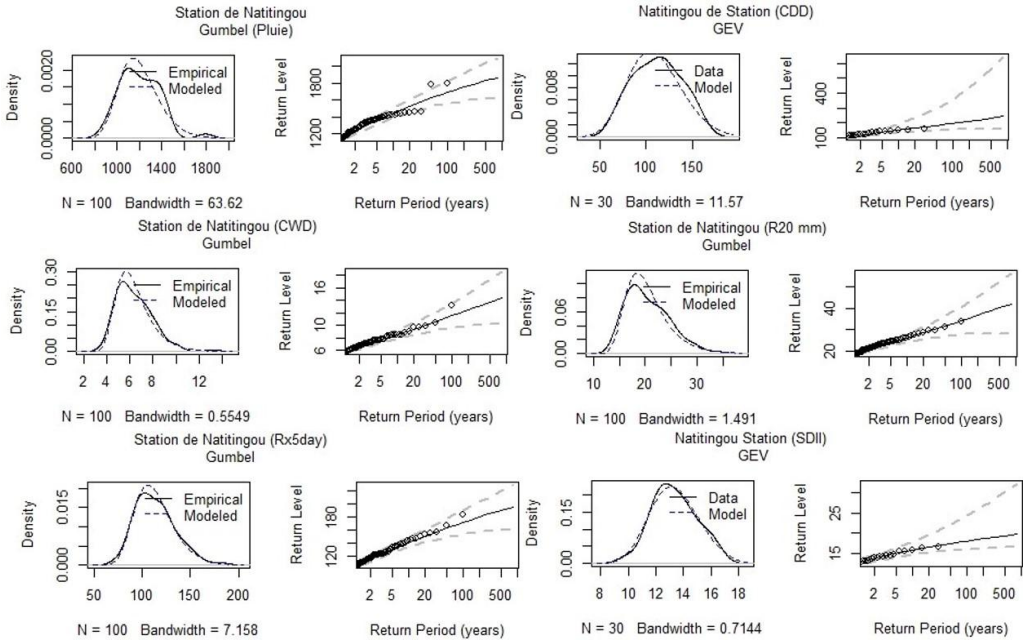

Fig. 6. Distribution des modèles fréquentiels

Les valeurs des différents quantiles de précipitations maximales, de période de retour T (P2, P5, P10, P20, P30, P50 et P100) ont été déterminées (tableau 5). La détermination des paramètres AIC et BIC consistent à choisir le modèle qui convient le mieux à la série chronologique des indices d'extrêmes.

Tableau 5. Quantiles des indices

Période de retour						
	02	05	10	20	50	100
Pluie moyenne	1174	1337	1444	1548	1681	1782
CDD	115	139	151	162	174	182
CWD	6	7	8	9	11	12
R 20mm	19	23	25	28	31	33
Rx5day	111	131	145	157	174	186
SDII	13	14	15	16	17,25	17,81

Pour la détermination des valeurs des quantiles estimée à différentes périodes de retour, les modèles GEV s'ajustent mieux aux différentes chroniques de CDD; SDII et Gumbel s'ajuste mieux aux différents chroniques de pluie; CWD; R 20mm et Rx5day.

Dans la zone Agro Ecologique 4, les quantiles de pluie associée à une période de retour de 50 ans et 100 ans sont estimées à 1681 mm et 1782 mm. Les quantiles des jours secs consécutif sont estimés à 174 jours et 182 jours. Il y a donc une probabilité de 0,01 % que ces évènements surviennent par années sur les 100 prochaines années. Ces évènements sont moins susceptibles de se produire. Ceux plus susceptible de se produire sont celles qui ont des périodes de retour de 02 ans (0,5 %), 05 (0,2 %) ans et 10 ans (0,1 %). Ces périodes sont associées à des quantiles relativement faibles comparé à ceux des évènements moins susceptibles de se produire. Pour la quantité maximale de pluie sur cinq jours elles sont estimées respectivement à 111 mm; 131 mm et 145 mm. De plus les évènements pluvieux rares (période de retour de 100 ans) s'expliquent par la baisse des jours humide consécutif au détriment des plus maximales sur cinq jours consécutifs et des pluies dont les hauteurs sont supérieures à 20 mm.

4.3 CARTOGRAPHIE DES RISQUES D'INONDATION DANS LA ZONE AGROECOLOGIQUE 4 DU BENIN

Le risque d'inondation dans la zone agroécologique 4 du Bénin est obtenu en combinant la carte de l'aléa et de vulnérabilité à l'inondation. La figure 7 présente les cartes de vulnérabilité, de l'aléa et du risque à l'inondation dans la zone Agro écologique 4.

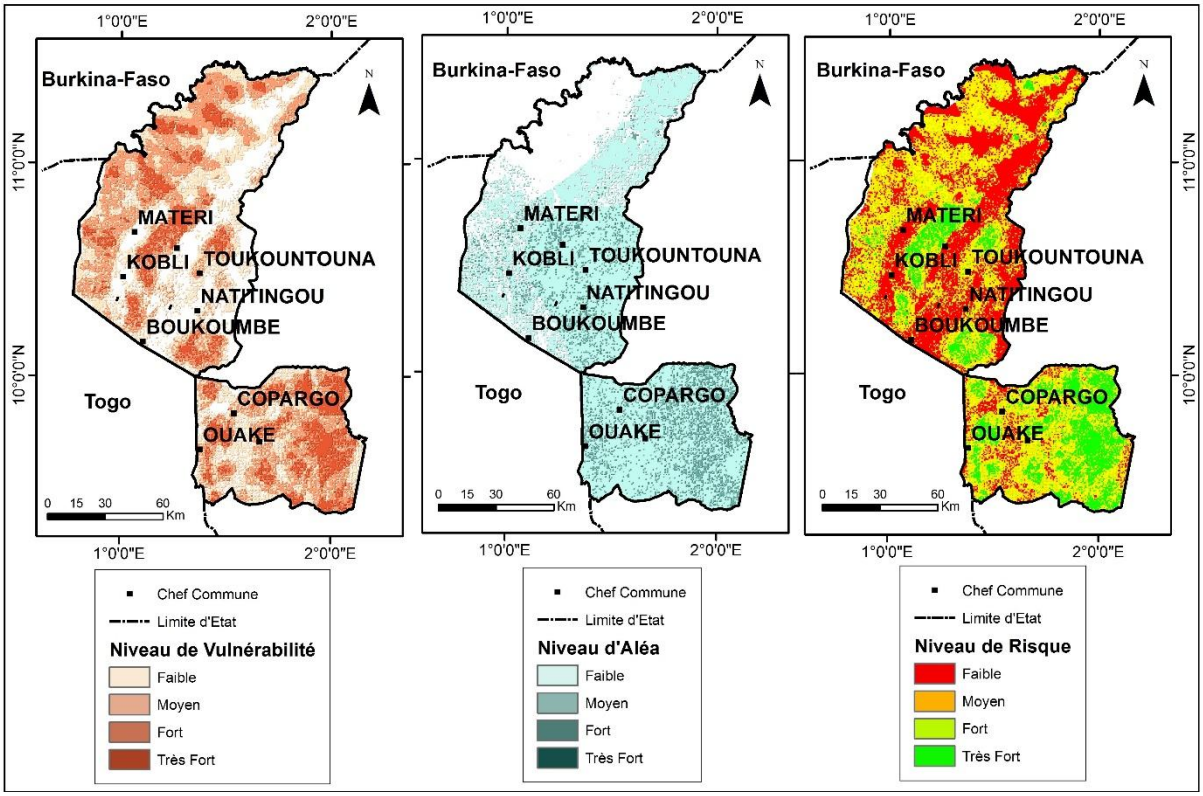

Fig. 7. Niveau de vulnérabilité, d'aléa et de risque à l'inondation dans la zone Agro Ecologique 4 du Bénin

La zone Agro Ecologique 4 présente un niveau de vulnérabilité moyen et fort avec des proportions respectives de 29,13 % et 29,97 %. Ces zones de vulnérabilité moyenne et forte sont plus situées dans les localités de toukountouna, copargo et boukoumbé. Les zones de très forte vulnérabilité à l'inondation recouvrent 14,28 % de la zone d'étude et se situent dans les localités de ouaké et plus au Sud-Est de la zone d'étude. De plus la carte de l'aléa qui est obtenu par reclassification et combinaison des champs de pluie et des unités d'occupation du sol. Les zones de faible aléa à l'inondation couvrent 24,59 % de la zone d'étude et se situent plus au Nord de la zone d'étude et correspond aux zones de faible pluie et de forêt claire. Les zones d'aléa à l'inondation moyenne recouvrent la majeure partie de la zone d'étude (64,82 %) et se situent plus sur le flanc droit de la partie Nord de la zone d'étude. Les zones de forte et très fort aléa recouvrent respectivement 10,57 % et 0,001 % de la zone d'étude. Le risque d'inondation est cartographié par la combinaison de la vulnérabilité et de l'aléa à l'inondation. La carte d'inondation révèle que 31,45 % de la zone d'étude est caractérisé par un risque faible à l'inondation. Ces zones sont plus situées dans la zone Sud-Ouest de la zone d'étude. Les zones à risque d'inondation moyen et fort recouvrent respectivement les 30,92 % et 22,37 % de la zone d'étude, et sont dispersés sur le flanc Ouest du secteur d'étude.

4.4 CARTOGRAPHIE DES RISQUES DE SECHERESSE DANS LA ZONE AGROECOLOGIQUE 4 DU BENIN

La figure 8 présente le niveau de vulnérabilité; de l'aléa et du risque de sécheresse dans la zone Agro Ecologique 4.

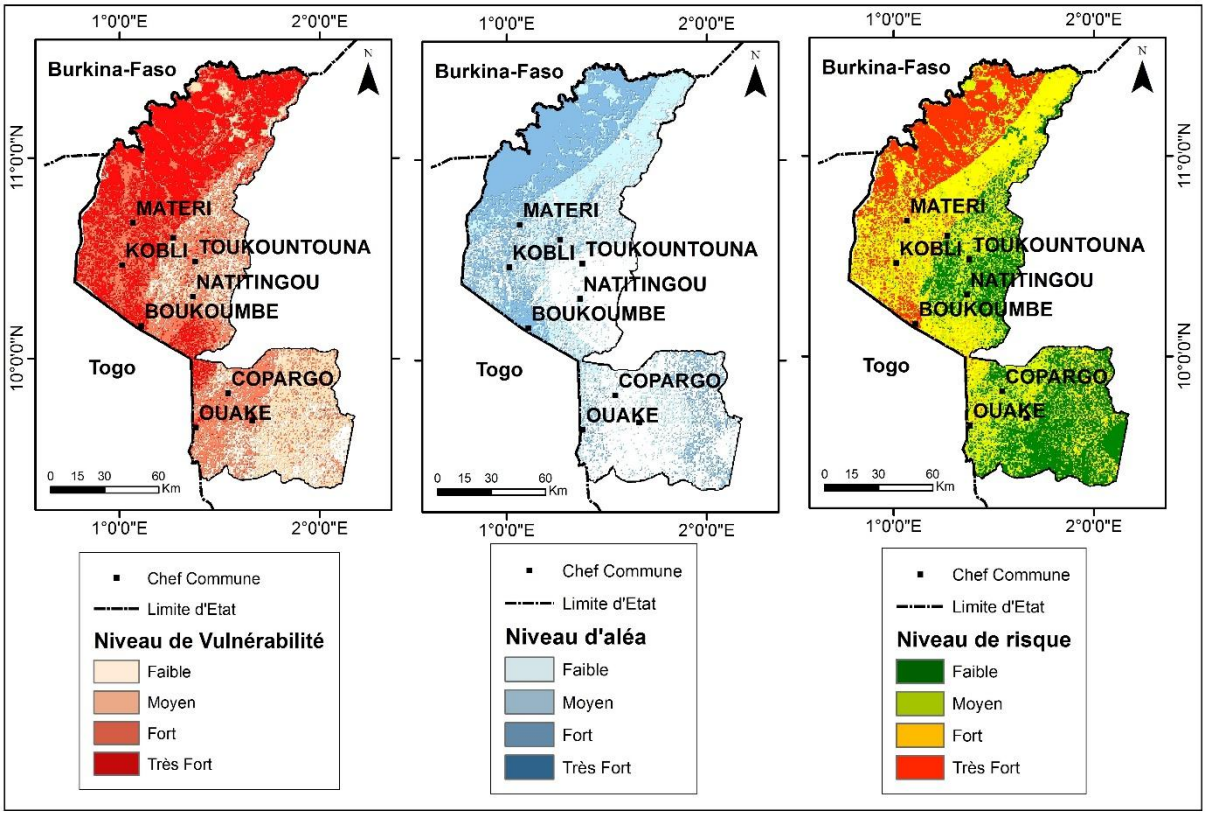

Fig. 8. Niveau de vulnérabilité, d'aléa et de risque à la sécheresse dans la zone Agro Ecologique 4

Le secteur d'étude présente sur son flan Nord et Nord-Ouest les zones de vulnérabilité très forte soit dans les localités de atérie, Kobli et Boukoumbé (34,37 %). Les zones de forte vulnérabilité à la sécheresse recouvrent 32,63 % de la superficie totale de la zone d'étude, et sont bien localisé dans les localités de Toukountouna et de Natitingou. Les zones de vulnérabilité faible et moyenne recouvrent respectivement 10,05 % et 22,87 % du secteur d'étude. Et sont plus concentré dans la partie Sud du secteur d'étude. De plus d'aléa moyen et fort recouvrent respectivement les 24,49 % et 29,67 % du secteur d'étude. Ces zones sont plus localisées au Nord-Ouest du secteur d'étude. Les zones de faible aléa à la sécheresse occupent 45,82 % du secteur d'étude et se localisent à Natitingou, Toukountouna et à Copargo. Les zones de très fort aléa à la sécheresse sont pratiquement insignifiantes (0,0015 %). La carte de risque de sécheresse révèle que les zones de très fort risque d'inondation recouvrent 17,70 % du secteur d'étude, et se situent dans la partie Nord-Ouest du secteur d'étude (Tanguiéta). Les zones de moyenne et fort risque de sécheresse recouvrent respectivement 19,44 % et 35,75 % de la zone d'étude (Matéri). Quant aux zones de faible risque à la sécheresse, elle recouvre 27,10 % du secteur d'étude et situe plus au Sud du secteur d'étude.

5 DISCUSSION

En Afrique de l'Ouest les conditions climatiques sont conditionnées par la mousson (Animashaun *et al.,* 2020). Dans le secteur d'étude s'observe une fluctuation des anomalies négatives et positives (1986-2002) et une reprise des pluies sur la période de 2003-2015 avec une succession d'anomalies positives. Ce constat est fait par Ouassa *et al.,* 2022 et Ouassa, 2023 au cours de son étude sur la caractérisation des évènements hydroclimatiques dans le bassin versant de la Pendjari. L'auteur stipule que la période de 1970-1991 est dominé par des anomalies négative traduisant les années sèches et la période 1992-2017 est marqué par une alternance d'année déficitaire et excédentaire correspondant ainsi à la période de reprise des hauteurs pluviométriques. La variabilité pluviométrique ainsi observé est conditionnée par le nombre de jour de pluie; le nombre de jour sec; la quantité de pluie tombé sur une plusieurs jours consécutivement. Nous constatons que la première phase observée dans la distribution temporelle des hauteurs de pluie s'explique par la baisse des jours humides consécutif au détriment des jours sec consécutifs. Sur la base des modèles GEV et Gumbel qui s'ajustent le plus aux différentes chroniques. Toutefois, la concentration des quantiles de pluies (fortes, très fortes et extrêmement fortes) pourrait contribuer en grande partie aux évènements extrêmes, dont les inondations qui ne sont pas sans conséquences sur la dynamique du bassin et sur la

vie socioéconomique des populations qui y vivent (Amoussou, et al., 2015). De plus, les résultats de cette étude montrent que les évènements pluvieux extrêmes (dont les périodes de retour sont situés entre 50 ans et 100 ans) sont plus causés par une augmentation des évènements pluvieux dont la quantité est supérieur à 20mm et des pluies maximales sur cinq jours consécutivement. L'augmentation des évènements pluvieux est minime comparé à celle des jours secs consécutif.

A l'échelle de vaste superficie, les outils de télédétection permettent d'obtenir diverses informations sur le secteur d'étude sous forme de carte thématique qui servent de facteurs de cartographique des différents processus. Tel est le cas pour cette étude la cartographie pour le risque d'inondation et de la sécheresse dans la zone Agro Ecologique 4.

La cartographie du d'inondation nécessite la combinaison de l'aléa à l'inondation et de la vulnérabilité à l'inondation. Pour la cartographie de la vulnérabilité à l'inondation il faut rigoureusement reclassifier et combiner la densité de drainage, la pente et la lithologie. Pour cartographier l'aléa il faut reclassifié et combiné la pluie et l'occupation du sol. La cartographie du risque d'inondation révèle que les zones à faible et moyen risque à l'inondation recouvrent respectivement 31,45 % et 30,92 % de la superficie totale du secteur d'étude. Les zones à fort et très fort risque d'inondation occupent respectivement 22,37 % et les 15,24 % du secteur d'étude. Les zones à fort risque à l'inondation sont plus localisées à l'environ immédiat des cours d'eau. Les forts débits enregistrés sur la rivière pendjari montrent que les débits de crue sont plus récurés voir 1969 (588.79 m^3 /s) et 1970 (625.2 m^3 /s) (Ouassa *et al.,* 2021). Ces forts débits sont engendrés par le cumule des pluies au cours de ces années (Ouassa *et al.,* 2021; Ouassa, 2023). Les zones de faible risque d'inondation correspondent aux zones de forte densité forestière. Koumassi, *et al*., 2014 au cours de son étude sur l'utilisation des outils de la télédétection pour la cartographie du risque d'inondation dans le bassin de la sota, révèle que les zones de à faible et moyen risque d'inondation couvrent respectivement 15% et 38 % et les 25 % et 16 % caractérisent le risque fort et très fort à l'inondation dans le secteur d'étude. Ces résultats sont semblables au ceux obtenus au cours de cette étude et ceux de Oussa, 2023; Koudamiloro *et al*., 2017; Kodja *et al.,* 2013.

La cartographie du risque de sécheresse requière la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité. L'obtention de la vulnérabilité passe par la reclassification de chaque facteur physique régissant la vulnérabilité à la sécheresse (température du sol, la végétation et la lithologie). L'aléa quant à elle se cartographie par reclassification et combinaison des unités d'occupation du sol et des champs de pluie. La cartographie du risque de sécheresse révèle que dans le secteur d'étude les zones de faible et moyen risque de sécheresse occupent respectivement 27; 10 % et 19,44 % de la superficie de la zone d'étude. Les zones de fort et très fort risque de sécheresse recouvrent quant à eux 35,75 % et 17,70 % du secteur d'étude. Ces valeurs élevées du risque de sécheresse s'expliquent par l'augmentation des températures maximales et minimales respectivement de 0,48 °C et 0,39 °C au niveau de la station synoptique de Natitingou (Ouassa *et al*., 2023). Plus loin la succession d'années de sécheresse pluviométrique modérée est à la base du risque de sécheresse (Ouassa *et al.,* 2021). Quant aux zones de faible risque à la sécheresse elles correspondent plus aux zones de forte pluie et aux zones de concentration de la végétation (forêt dense). Ouassa, 2023 au cours de son étude sur les évènements hydroclimatiques extrêmes et sécurité alimentaire dans le bassin béninois de la pendjari a l'exutoire de porga montre que 13 % de la superficie du bassin est sujet au fort risque de sécheresse. Les 80 % du bassin de la pendjari est sujet au risque de sécheresse moyen et 7 % correspond au faible risque de sécheresse. De plus Koudamiloro *et al.,* 2017 qui au cours de ces travaux sur Analyse de la vulnérabilité à la sécheresse et à l'inondation dans le bassin versant du fleuve Ouémé à Bétérou a combiné la sensibilité (occupation du sol), la capacité d'adaptation à la sécheresse et le nombre d'années déficitaires. La combinaison de ces différents facteurs lui permet d'avancer que 12,55 % du bassin de Bétérou et faiblement vulnérable à la sécheresse, 49,35 % y est moyennement vulnérable et les zones à forte et très forte vulnérabilité à la sécheresse occupent 12,71 % et 24,80% de la superficie totale du bassin. Les proportions observées dans le bassin de bétérou ne concordent pas en tout point avec les résultats de cette étude, cela s'expliquerai par le fait que les mêmes facteurs ne sont pas pris en compte pour la vulnérabilité à la sécheresse dans cette étude, la taille du secteur, les conditions climatiques qui ne sont pas les mêmes ou soit le phénomène d'orographie qui est généré par les chaines de l'Atacora dans notre secteur d'étude (Yabi, 2008).

6 CONCLUSION

Au terme de cette étude, il faut signaler que dans la zone agro écologique 4, Les zones à fort risque à l'inondation sont plus localisées à l'environ immédiat des cours d'eau et occupent 22,37 % de la superficie de la zone agro écologique 4. Il faut retenir également que le risque d'inondation est fort dans les zones de forte concentration d'agglomérations. En ce qui concerne le risque de sécheresse, il est constaté une hausse de ce dernier en raison de l'augmentation des températures maximales et minimales respectivement de 0,48 °C et 0,39 °C.

REFERENCES

[1] Amoussou (E.), Totin (H. S. V.,) Vissin (W. E.), Mahe (G.), Houndenou (C.) et Boko (M.), 2015. « Modélisation pluie-débit pour la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) de surface dans le bassin versant de la Volta au Bénin » in Revue de géographie du laboratoire Leïdi – ISSN 0851 – 2515 – n°13, décembre 2015. Pp 282-296.

[2] Animashaun IM, Oguntunde PG, Akinwumiju AS, Olubanjo OO, (2020): Rainfall analysis over Niger Central Hydrological Area, Nigeria: variability, trend and change-point detection. Sci Afri. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00419.

[3] Gilard O., et Gendreau N, (1998): « Inondabilité: Une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants«, Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 11, n° 3, 1998, p. 429-444.

[4] Harding R. J., Clark R. B., Xue Y. et Valdes P. J. (2001): Modeling the impact of land surface degradation on the tropical North Africa. Journal of Climate Vol. 14 N°8, pp. 1809-1822.

[5] Henry J.B (2006): Systemes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine, Thèse de Doctorat d 'Université, Université de Strasbourg I, France, 271p.

[6] Houssou, C.S. (1998): Les bioclimats humains de l'Atacora (nord-ouest du Bénin) et leurs implications socio-écnomiques. Master's Thesis, Université de Dijon, Dijon.

[7] Kodja D. J., Vissin E.W., Amoussou E., et Boko M., (2013): Risques hydroclimatiques et problèmes d'aménagement hydroagricole dans la vallée de l'Ouémé à Bonou (Afrique l'Ouest), in climat, Agriculture ressources en eau d'hier à demain, actes du 30ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Cotonou (bénin).

[8] Koudamiloro Olivier, Dipama J.-M., Vissin E.W. (2017): Analyse de la vulnérabilité à la sécheresse et à l'inondation dans le bassin versant du fleuve Ouémé à Bétérou au Bénin (Afrique de l'Ouest), November 2017, Techniques Sciences Méthodes, https://doi.org/10.1051/tsm/201711029.

[9] Koumassi, D. H., Tchibozo, A. E., Vissin, E., & Houssou, C. (2014): Analyse fréquentielle des évènements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin. Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie, 10 (2).

[10] Onana V.P., Rudant J.P., Etouna J., et Wade S (2005): Dynamique urbaine à l'aide d'images RSO de ERS et HRV de spot, et son impact dans les facteurs d'aggravation des risques d'inondation en milieu urbain: cas de la ville de douala (cameroun), Télédétection, 2005, Vol. 5, n° (1-2-3), p 19-32.

[11] Ouassa Pierre, Gervais Assaï Akanni Atchadé, Domiho Japhet Kodja, Fernand Ringo Avahounlin, and Expédit Wilfrid Vissin, (2021): Stratégies d'adaptation des producteurs agricoles aux risques hydroclimatiques dans le bassin Béninois de la pendjari à l'exutoire de Porga, International Association of Hydrological Sciences, IAHS, 384, 319–324, 2021.

[12] Ouassa Pierre, Capo Atidegla Séraphin, Sodji Jean, Vissin Expédit Wilfrid (2022): SIG Pour l'Optimisation de la Cartographie de l'Influence Des Evènements Hydroclimatiques Extrêmes sur l'Etat de la Sécurité Alimentaire dans le Bassin Béninois de la Pendjari à l'Exutoire de Porga, International Journal of Progressive Sciences and Technologies, Vol. 34 No. 2 September 2022, pp. 235-248.

[13] Ouassa P. (2022): Evènements hydroclimatiques extrêmes et sécurité alimentaire dans le bassin béninois de la Pendjari à l'exutoire de Porga. Thèse de docotorat, GAGIEE, CIPMA, UAC, 294p.

[14] Tente B. A., (2005): Recherche sur les facteurs de la biodiversité floristique des versants du massif de l'Atacora: secteur Perma-Toucountouna (Bénin). Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, 252 p.

[15] Yabi, I. (2008): Etude de l'agroforesterie à base de l'anacardier et des contraintes climatiques à son développement dans le Centre du Bénin (239 p.). Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abomey-Calavi. Ecole Doctorale Pluridisciplinaire Espace, Cultures et Développement.