



CARACTERISATION DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES DANS LE BASSIN VERSANT BENINOIS DE LA PENDJARI A L'EXUTOIRE DE PORGA (AFRIQUE DE L'OUEST)

CHARACTERIZATION OF HYDROCLIMATIC RISKS IN THE BENINESE WATERSHED OF THE PENDJARI AT THE PORGA OUTLET (WEST AFRICA)

| Pierre Ouassa ^{1*} | Romaric Ogouwalé ² | and | Olivier Koudamiloro ³ |

¹ Doctorant en GéoInformation et ses Applications à la Gestion Intégrée des Eaux et des Ecosystèmes (GAGIEE) | Chaire Internationale de Physique Mathématique et Applications (CIPMA CHAIRE-UNESCO, FAST, UAC | Rép. du Bénin |

² Enseignant Chercheur au Département de Géographie et Aménagement du Territoire (DGAT, FASHS, UAC, Rép. du Bénin) | Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE) | Université d'Abomey-Calavi | République du Bénin |

³ Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE) | Université d'Abomey-Calavi | République du Bénin |

| Received May 31, 2020 |

| Accepted June 06., 2021 |

| Published June 09, 2021 |

| ID Article | Ouassa-Ref1-ajira310521 ra090221 |

RESUME

Introduction : Le bassin béninois de la Pendjari est exposé aux effets des événements hydroclimatiques extrêmes qui affectent négativement les activités des populations. La présente recherche vise à caractériser les risques hydroclimatiques dans le bassin béninois de la Pendjari à l'exutoire de Porga. **Méthodes :** L'approche méthodologique adoptée, a consisté à l'utilisation des données climatologiques (hauteur de pluies journalières et mensuelles) des stations de Tanguiéta et Natitingou sur la période de 1965 à 2017 obtenues à Météo-Bénin. Les données hydrologiques constituées des débits journaliers du fleuve Pendjari à l'exutoire de Porga, sur la période 1965-2017 sont extraites de la base de données de la DG-Eau. Les méthodes diagnostiques du climat utilisées sont essentiellement statistiques et concernent l'analyse fréquentielle et le calcul des indices de sécheresse. **Résultats :** L'analyse des résultats obtenus montre que pour l'ensemble de la série 1965-2017, il y a eu une année (1968) d'humidité extrême et deux années (1978, 2015) de sécheresse extrême ce qui favorise l'existence de risques hydroclimatique dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga. De même, les résultats indiquent que, dans le bassin de la Pendjari, les récurrences des pluies et débits maximaux sont de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans et permettent de conclure que le secteur d'étude peut être en proie à des crues exceptionnelles susceptibles d'occasionner des inondations qui ne seront pas sans conséquence sur les activités des populations. Ce qui pourrait induire une crise d'insécurité alimentaire dans les ménages du bassin.

Mots clés : Bassin béninois de la Pendjari, Risques hydroclimatiques, caractérisation

ABSTRACT

Background: The Pendjari basin of Benin is exposed to the effects of extreme hydroclimatic events that negatively affect population activities. This research aims to characterize the hydroclimatic risks in the Benin basin of the Pendjari at the outlet of Porga. **Methods:** The methodological approach adopted consisted in the use of climatological data (daily and monthly rainfall height) from the Tanguiéta and Natitingou stations over the period from 1965 to 2017 obtained in Météo-Benin. Hydrological data consisting of the daily flows of the Pendjari River at the Porga outlet, over the period 1965-2017 are extracted from the DG-Water database. The climate diagnostic methods used are mainly statistical and concern frequency analysis and calculation of drought indices. **Result:** The analysis of the results obtained shows that for the whole series 1965-2017, there was one year (1968) of extreme humidity and two years (1978, 2015) of extreme drought which favors the existence of hydroclimatic risks in the Benin basin of the Pendjari in Porga. Similarly, the results indicate that, in the Pendjari basin, the recurrences of rains and maximum flows are 2, 5, 10, 20, 50 and 100 years and allow us to conclude that the study area may be plagued by exceptional floods likely to cause floods that will not without consequence on the activities of the populations. This could lead to a crisis of food insecurity in households in the basin.

Key words: Benin Pendjari Basin, Hydroclimatic risks, characterization.

1. INTRODUCTION

Le Sahel et l'Afrique de l'Ouest sont, selon le GIEC (2007), parmi les régions les plus vulnérables aux fluctuations climatiques futures [1]. Le Sahel doit compter aussi avec une forte croissance démographique (3 % en moyenne par an), qui contribue à une dégradation forte et continue des ressources naturelles, aggravant ainsi la pauvreté et l'insécurité alimentaire. Les perspectives démographiques s'accordent sur une population de 100 millions de personnes à l'échéance 2025, avec la moitié de cette population dans les villes [2].

L'Afrique de l'ouest a subi pendant les décennies 70 et 80 une sécheresse d'une ampleur et d'une intensité inégalées dans le monde qui a entraîné de nombreuses crises alimentaires et sanitaires. Les pics secs des années 1973-74 et 1984-85 ont été particulièrement dramatiques pour les populations. Aujourd'hui encore, la région est régulièrement affectée par des famines dues à des saisons des pluies déficitaires [3].

Par ailleurs, selon le GIEC (2014), de nombreux risques représentent des problèmes particuliers pour les pays les moins développés et les collectivités vulnérables, vu leur capacité limitée d'y faire face [4]. Les personnes marginalisées sur le plan social, économique, culturel, politique, institutionnel ou autre sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques. Ainsi, en raison des répercussions massives des changements climatiques

sur leur économie (sécheresses récurrentes, inondations, dégradation des terres, baisse de la productivité etc.), l'urgence est à la recherche de modes d'intervention innovants pour faire face aux nombreux problèmes. Dans ce cadre, de nombreux paramètres doivent être maîtrisés en matière de gestion des ressources naturelles en s'appuyant notamment sur un système performant de collecte de données, une bonne gestion des connaissances et des savoirs ainsi qu'un bon système d'aide à la décision [5].

En effet, autant les extrêmes hydroclimatiques de l'époque contemporaine perturbent le fonctionnement normal des activités socioéconomiques, autant ils représentent des facteurs de risques qui fragilisent la santé des populations [6]. Ainsi, au Bénin, selon les résultats des travaux de [7], les principaux risques qui menacent les populations béninoises sont les inondations et les sécheresses.

Les études menées dans le bassin de la Pendjari au Bénin, ont montrés que le bassin est marqué par une tendance générale à la baisse des hauteurs pluviométrique [8] avec pour corollaire la baisse de 54 % des débits enregistrés dans le bassin [9]. Au vu de ces constats, il est opportun de mener une étude sur les risques hydro-climatiques dans le bassin béninois de la Pendjari, pour réduire la vulnérabilité des populations aux risques liés à la variabilité hydro-climatique et de garantir une bonne gestion des ressources en eau pour le développement agricole. Le bassin Béninois de la Pendjari est situé entre les parallèles 10°21' et 10°46' de latitude nord et les méridiens 1°12' et 1°38' de longitude est. Le bassin versant béninois de la Pendjari est sous l'influence du climat soudanien (climat tropical chaud et humide) ou soudano-guinéen qualifié d'atacorien [10]. Il est caractérisé par une alternance d'une saison sèche et d'une saison pluvieuse. La saison pluvieuse de 5 à 6 mois (mai à octobre) est dominée par les flux de mousson, mais aussi ceux liés aux lignes de grains, génératrices de fortes averses sur la région. La pluviosité est de 1131,3 mm. Les mois de juillet, août et septembre sont les plus pluvieux avec une moyenne de 227,5 mm par mois. Les températures restent élevées toute l'année mais elles ne sont jamais excessives. Les moyennes annuelles varient de 26,8 °C à 27,7°C, soit une augmentation de 0,9 °C sur la période 1965-2017. Ces moyennes, constamment élevées et presque homogènes pour l'ensemble de la région ne constituent pas un facteur limitant pour les activités agricoles.

Les sols rencontrés dans le bassin de la Pendjari sont généralement latéritiques, gravillonnaires, graveleux, sablonneux, argileux [11]. Ces sols sont pour la plupart lessivés, ce qui a considérablement réduit leur fertilité à cause de la forte dégradation dont ils sont l'objet et qui est liée, entre autres, aux techniques culturales inadaptées pratiquées par les populations et la faible capacité de gestion des eaux de drainage. Les sols lessivés à concrétion et les sols lessivés indurés sont caractéristiques de la plaine de Gourma et sont modérément aptes à la plupart des spéculations agricoles cultivées dans le bassin béninois de la Pendjari [8].

Le réseau hydrographique du bassin versant de la Pendjari est contrôlé par la rivière Pendjari qui prend sa source à Pèporiakou (dans la Commune de Natitingou). En effet, longue de 420 km au Bénin, la Pendjari est le principal cours d'eau de la portion nationale du Bassin. Ce "fleuve" est alimenté par de nombreux affluents et sous affluents pour la plupart temporaires (ne coulant qu'en saison des pluies) [11, 10]. La figure 1 présente la situation géographique du bassin béninois de la Pendjari.

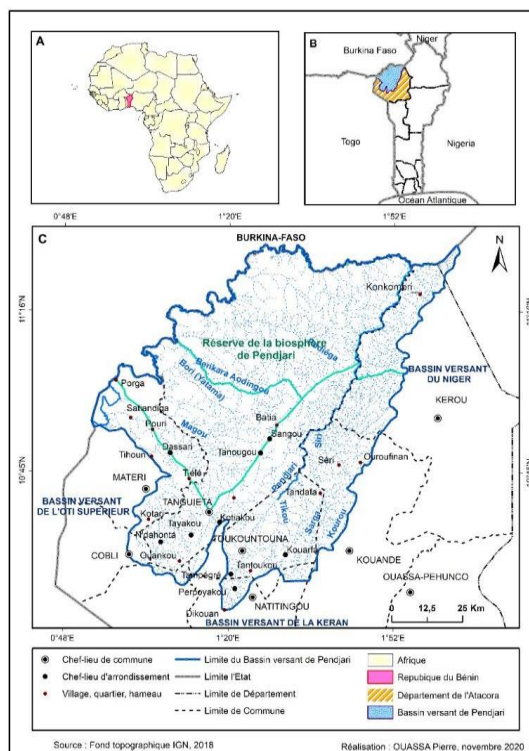


Figure 1 : Situation géographique du bassin de la Pendjari au Bénin.

2. MATERIELS AND METHODES

2.1. Données utilisées

Plusieurs types de données sont utilisés dans le cadre de cette étude. Il s'agit notamment :

- des données climatologiques : pluviométrie (journalières, mensuelles et annuelles) répartie dans le bassin béninois de la Pendjari sur la période 1965-2017 et les températures maximales et minimales (mensuelles) de la station synoptique de Natitingou obtenus à Météo-Bénin.
- des données hydrométriques (débits journaliers et mensuels) de la station de Porga sur la période 1965-2017) ont été tirées des bases de données du Service de l'Hydrologie de la Direction Générale de l'Eau à Cotonou ;
- des informations qualitatives recueillies lors des investigations socio-anthropologiques.

2.2. Méthodes utilisées

L'échantillon est constitué des différents acteurs du secteur agricole sélectionnés au cours des saisons sèche et pluvieuse en fonction des activités exercées sur les différentes aires de cultures. Au cours de ces enquêtes, un échantillon composé essentiellement de la population agricole, des présidents d'association agricoles et de développement ayant une connaissance sur la variabilité climatique et la vulnérabilité des populations a été élaboré. A ceux-là, s'ajoutent les agents de développement rural, cadres techniques du ministère de l'agriculture, etc.

Le choix des enquêtés est fait sur la base des critères bien définis:

- avoir au moins quarante (40) ans et résider dans la localité pendant les trois (3) dernières décennies pour pouvoir témoigner des perturbations hydroclimatiques dans le secteur d'étude ;

La taille de l'échantillon a été déterminée suivant la formule de [12]. Ainsi, elle a été calculée avec un degré de confiance de 95 % soit une marge d'erreur de plus ou moins 5 %.

$$N = \frac{Z\alpha^2 PQ}{d^2} \quad (1)$$

Avec : N= taille de l'échantillon par arrondissement ; $Z\alpha$ = écart fixé à 1,96 correspondant à un degré de confiance de 95 % ; P = nombre de ménages de l'arrondissement / nombre ménages de la commune. d = marge d'erreur qui est égale à 5 % ; $Q = 1 - P$

En procédant ainsi par commune, un taux d'échantillonnage de 30 % est appliqué au résultat pour déterminer le nombre exact de ménages à enquêter. Au total 126 personnes dont 105 producteurs agricoles et 21 personnes ressources ont été enquêtées dans 21 villages dans le cadre cette étude. Les méthodes utilisées pour caractériser les risques hydroclimatiques dans le cadre de ce travail sont essentiellement statistiques.

2.2.1. Méthode de caractérisation du risque de sécheresse

Les sécheresses peuvent être quantifiées en utilisant plusieurs indices. Dans le cadre de cette étude l'indice standardisé de précipitation [13] ont été utilisées. L'analyse de la sécheresse revient en fait, à la prise en considération de sa durée ainsi que de sa sévérité, de son intensité et de son extension spatiale [13].

- **Indice de précipitations standardisé (SPI)**

L'indice standardisé de précipitations « SPI » (Standardised Precipitation Index) peut caractériser les déficits de précipitation pour une période donnée. Il se fonde d'une part, sur la définition d'un seuil pour se prononcer sur l'état ou non de sécheresse en déclarant la période, objet de l'étude, sèche ou pas et présuppose d'autre part, l'identification de l'année normale ou moyenne. A l'issue de cette opération, il est possible de déterminer le nombre d'années par gamme SPI et la signification correspondante en terme d'ampleur du phénomène climatique (Tableau 1) à partir de l'équation suivante :

$$SPI = (pi - pm)/\sigma \quad (2)$$

Pi est la Précipitation de l'année i, **Pm** la Précipitation moyenne et **σ** la Déviation standard ou écart type.

Tableau 1 : Classification de la sécheresse en rapport avec la valeur du SPI.

Classe SPI	Interprétation
SPI>2	Humidité Extrême
1<SPI<2	Humidité Forte
0<SPI<1	Humidité modérée
-1<SPI<0	Sécheresse Modérée
-2<SPI<-1	Sécheresse Forte
SPI<-2	Sécheresse Extrême

Les avantages de cet indice résident dans le fait qu'il est simple (utilise seulement les précipitations) et qu'il peut être calculé pour différentes échelles de temps, utilisé dans l'alerte précoce à la sécheresse et aider dans l'évaluation de sa sévérité.

• Détermination des séquences sèches

Pour étudier la sécheresse, il a été calculé les durées des séquences sèches les plus longues en début (mois de mai et juin) et en fin de saison (août, septembre), puis leurs évolutions interannuelles ont été étudiées. On définit une séquence sèche pour une période donnée comme étant le nombre maximal de jours consécutifs sans pluies. Dans cette étude on considère une période sèche, une séquence d'au moins 15 jours consécutifs sans pluie journalière d'une hauteur de 1 mm pendant la saison pluvieuse [10].

2.2.2. Méthode de caractérisation du risque d'inondation

L'étude de la caractérisation de risque d'inondation nécessite une analyse fréquentielle des débits et des précipitations en vue de la détermination des probabilités d'occurrence et les périodes de retour (prévision) à l'échelle des stations hydrométriques et pluviométriques du bassin Béninois de la Pendjari. Ainsi, l'analyse fréquentielle va permettre de caractériser l'évolution des pluies et des débits extrêmes enregistrés afin d'en définir les probabilités d'occurrence ([6]). Cette méthode repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel, qui est une équation décrivant le comportement statistique d'une série de pluies et de débits extrêmes [6].

• Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future [14, 15, 16, 17]. Le but visé par cette analyse dans le cadre de cette étude est de déterminer la fréquence d'occurrence des événements extrêmes (qui peuvent causer des inondations) dans le bassin Béninois de la Pendjari. Pour cela, la série des hauteurs maximales de pluie a été constituée. Pour estimer les pluies maximales et les débits de pointe correspondants à une certaine durée de retour, c'est-à-dire à une certaine probabilité d'apparition donnée, la série des hauteurs maximales de pluie et des débits maximaux a été constituée.

Conformément à la méthodologie de l'analyse fréquentielle, il faut assurer l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité de la série [18]. Les hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité sont vérifiées. L'hypothèse d'indépendance a été validée à l'aide du test de Wald-Wolfowitz [6]. Les tests d'homogénéité et de stationnarité utilisés sont respectivement ceux de Wilcoxon et de Kendal (1962) cité par ST-Hilaire (2005) [19, 16]. L'ensemble des étapes méthodologiques est accompli à l'aide du logiciel HYFRAN.

• Choix du modèle fréquentiel

Le choix d'un type de modèle probabiliste est souvent basé sur des habitudes locales, qui, à la longue, deviennent de véritables coutumes. Dans certains pays, il existe en effet des règles ou normes qui fixent la méthodologie d'une analyse fréquentielle.

• Loi de Gumbel

La loi statistique qui ajuste mieux les différentes séries de pluie est le Gumbel [6]. En effet, il s'agit d'une loi d'ajustement fréquentielle très souvent utilisée pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes. La fonction de répartition de la loi de Gumbel $F(x)$ s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right) \quad (3)$$

avec la variable réduite suivante : $U = \frac{x-a}{b}$

où a et b sont les paramètres du modèle de Gumbel. La distribution s'écrit alors de la manière suivante:

$$F(x) = \exp(-\exp(-u)) \text{ et } u = -\ln(F(x))$$

Où a est le paramètre de position, b le paramètre d'échelle et c le paramètre de forme et x la variable, ici les hauteurs de pluie et les débits.

Le temps de retour T d'un événement est défini comme étant l'inverse de la fréquence d'apparition de l'événement, soit :

$$T = \frac{1}{1 - F(xi)} \quad (4)$$

Il a permis d'estimer le temps de retour, en termes de probabilité d'apparition, des événements climatiques et hydrologiques extrêmes et d'en déduire les deux paramètres a et b de la loi.

• Ajustement du modèle fréquentiel

La technique d'ajustement utilisée est la méthode graphique, bien qu'étant une méthode approximative, a le très grand avantage de fournir une représentation visuelle des données et de l'ajustement. Celle-ci constitue un aspect

essentiel du jugement porté sur l'adéquation entre la loi choisie et les données traitées, quelle que soit la méthode d'ajustement utilisée. Cette méthode repose sur le fait que l'expression d'un quantile correspond à l'équation d'une droite. En conséquence, les points de la série à ajuster sont reportés dans un système d'axes (x ; y). A partir de ce système d'axes, il a été alors possible de tracer la droite qui passe le mieux par ces points et d'en déduire les deux paramètres a et b définissant la loi.

3. RESULTS

3.1. Caractérisation de la sécheresse dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga

3.1.1. Analyse des Indices de Précipitations Standardisés (SPI)

Les risques liés à la sécheresse sont abordés, car il n'y a que peu de pays qui rapportent systématiquement les pertes et effets dus à la sécheresse ; pourtant ses impacts sur la production agricole, les moyens de subsistance ruraux et les secteurs urbains et économiques sont manifestes et considérables [20]. Le calcul du SPI a été utilisé en vue de caractériser le niveau de sévérité des déficits pluviométriques observés et d'apprécier l'ampleur de la sécheresse ou de l'humidité (tableau 2).

Tableau 2 : Classification des années selon les SPI dans le milieu d'étude.

Evènements	Types d'années					
	Humidité extrême	Humidité forte	Humidité modérée	Sécheresse modérée	Sécheresse forte	Sécheresse extrême
Natitingou	1968	1969, 2003	1965, 1966 1967, 1974 1975, 1978 1991, 1994 1995, 1996 1998, 2004 2007, 2008 2009, 2010 2011, 2012	1970, 1971 1972, 1973 1976, 1979 1980, 1981 1982, 1984 1986, 1988 1989, 1990 1992, 1993 1999, 2001 2002, 2005 2015, 2016 2017	1977, 1983 1985, 1987 1997, 2000 2006, 2013 2014	Aucune
Effectif	01	02	18	23	09	00
Pourcentage	1,89 %	3,77 %	33,97 %	43,39 %	16,98 %	00 %
Tanguiéta	Aucune	1968, 1998 2002, 2008 2010,	1967, 1969 1970, 1972 1974, 1975 1991, 1993 1994, 1996 1999, 2000 2004, 2005 2007, 2006 2009 2012, 2014 2016, 2017	1965, 1966 1971, 1973 1976, 1979 1980, 1981 1982, 1983 1984, 1986 1987, 1988 1989, 1992 1995, 1997 2001, 2013	1977, 1985 1990, 2003 2011,	1978, 2015
Effectif	00	05	21	20	05	02
Pourcentage	00 %	09,43 %	39,63 %	37,74 %	09,43 %	03,77 %
Moyennes	0,95 %	6,60 %	36,80 %	40,57 %	13,21 %	1,89 %

Source: Traitement des données 2020.

De l'analyse du tableau 2, il ressort que le bassin béninois de la Pendjari a enregistré 0,95 % d'années à humidité extrême, 6,60 % d'années à humidité forte, 36,80 % pour les années à humidité modérée, 40,57 % d'années à sécheresse modérée, 13,21 % d'années à sécheresse forte et 1,89 % d'années à sécheresse extrême. Les types d'années pluvieuses enregistrées sont hétérogènes d'une station à une autre. Il convient de signaler que pour l'ensemble de la série 1965-2017, il y a eu une année (1968) d'humidité extrême et deux années (1978, 2015) de sécheresse extrême ce qui favorise l'existence de risques hydroclimatique dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga.

Cette variabilité des années extrêmement sèches et extrêmement humides au niveau du bassin versant de la Pendjari peut avoir des impacts négatifs sur certaines activités humaines telles que l'agriculture qui est une source de nourriture très importante pour la population du bassin.

3.1.2. Analyse des séquences sèches

Les séquences sèches au cours de la période 1965-2017 se réfèrent à une hauteur de 1 mm pendant la saison pluvieuse pluies sur plusieurs jours consécutifs, soit une séquence sèche d'au moins 15 jours consécutifs selon la recommandation en agroclimatologie [10]. Lorsqu'elles deviennent plus ou moins longues, elles constituent un événement préjudiciable aux cultures et diminuent le potentiel des réserves quant à la demande en eau. Les figures 2 et 3 montrent le nombre moyen de séquences sèches de 1965 à 2017.

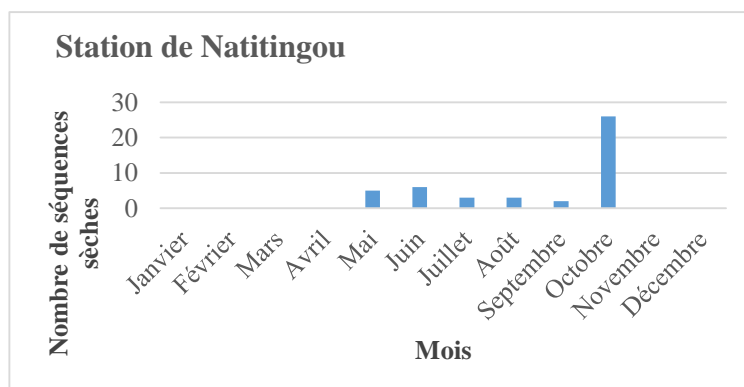


Figure 2 : Nombre moyen de séquences sèches de 1965 à 2017 dans le bassin Béninois de la Pendjari à la station de Natitingou.

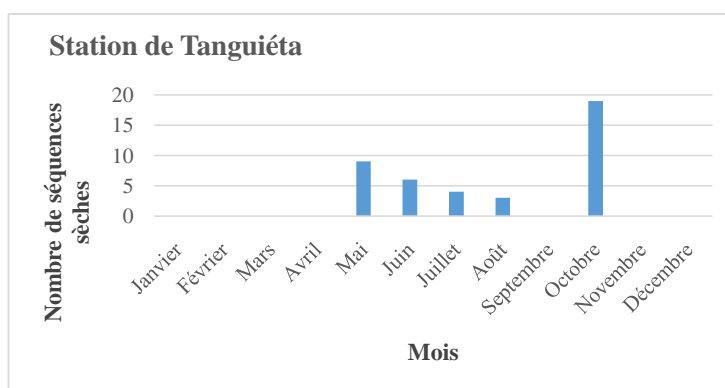


Figure 3 : Nombre moyen de séquences sèches de 1965 à 2017 dans le bassin Béninois de la Pendjari à la station de Tanguiéta.

Il résulte de l'analyse des figures 2 et 3 que les mois de mai et d'Octobre enregistrent plus de séquences sèches d'au moins 15 jours consécutifs. Ces mois coïncident avec le début et la fin des saisons pluvieuses et agricoles dans le bassin Béninois de la Pendjari. Les séquences sèches sont beaucoup plus fréquentes au niveau de la station de Natitingou où tous les mois de la saison agricole ont connus de séquences sèches comparativement à celle de Tanguiéta sur la période de 1965 à 2017. Ainsi d'après les populations rencontrées les séquences sèches se manifestent par l'assèchement brusque des sols avec pour corolaire l'enracinement médiocre des cultures compromettant ainsi, le rendement des cultures dans le bassin de la Pendjari au Bénin.

3.2. Caractérisation du risque d'inondation dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga

Pour la caractérisation du risque d'inondation, d'abord le niveau de danger (probabilité d'occurrence d'un événement donné et intensité de l'aléa d'inondation) sera déterminé.

3.2.1. Analyse fréquentielle des hauteurs de pluie maximales susceptibles d'occasionner les risques d'inondations dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga

Pour l'aléa pluviométrique, les précipitations maximales représentent le premier facteur déclenchant des mécanismes de crue et d'inondation [21]. La fréquence d'apparition des hauteurs maximales journalières de pluie dans le bassin est présentée par les figures 4 et 5.

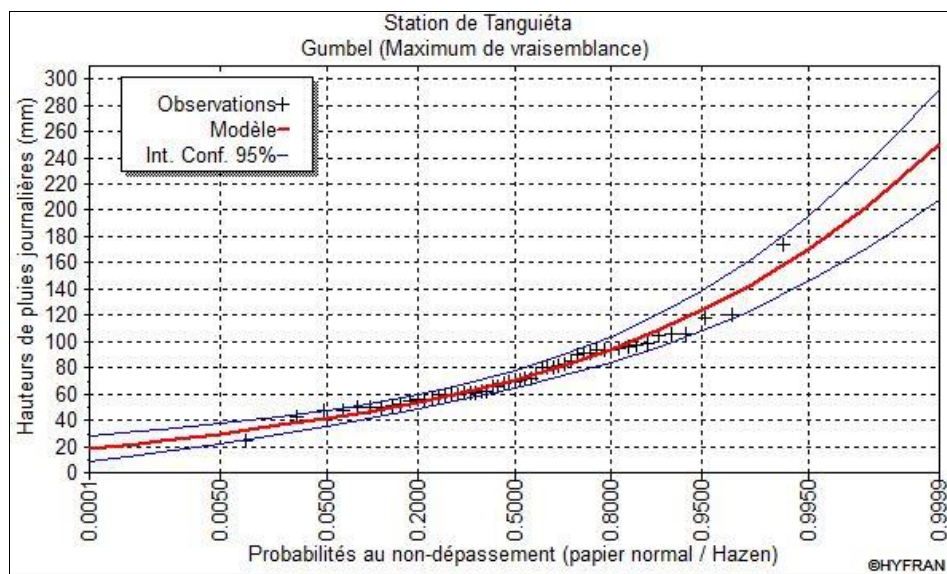


Figure 4 : Ajustement de la loi de Gumbel sur le bassin de la Pendjari à la station de Tanguiéta.

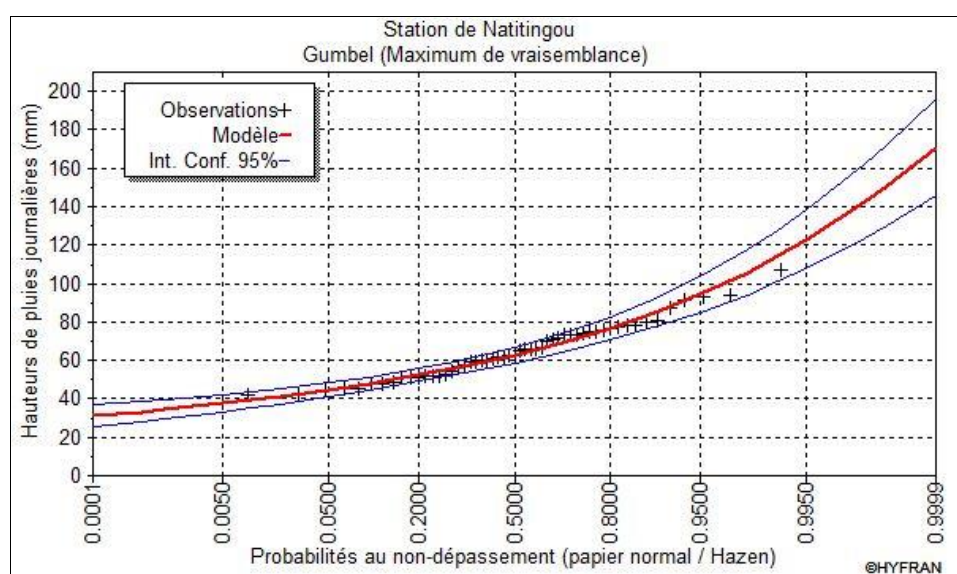


Figure 5 : Ajustement de la loi de Gumbel sur le bassin de la Pendjari à la station de Natitingou.

Il ressort de l'analyse des figures 4 et 5 que, les pluies extrêmes ont tendance à mieux s'ajuster à la loi de Gumbel avec un intervalle de confiance estimé à 95 %. Conformément à la méthodologie de l'analyse fréquentielle, il faut assurer l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité de la série [18]. Les tests d'homogénéité et de stationnarité utilisés sont respectivement ceux de Wilcoxon et de Kendal [19] (tableau 3).

Tableau 3 : Résultats des tests statistiques appliqués aux précipitations maximales

Station	Test d'indépendance		Test stationnarité		Test homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
Station de Tanguiéta	0,703	0,482	1,07	0,283	0,31	0,71
Station de Natitingou	0,813	0,416	0,522	0,602	0,732	0,207

On retient de l'analyse des résultats de ce tableau 3 que, les séries pluviométriques maximales journalières sont indépendantes, homogènes et stationnaires dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga. A partir de l'équation de la droite de Gumbel, les quantiles de pluies maximales ont été calculés pour différentes périodes de retour et leurs intervalles de confiance (Tableau 4).

Tableau 4 : Quantiles de pluies et les périodes de retour le bassin béninois de la Pendjari à Porga

Récurrences	2 ans	3 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Station de Tanguiéta	71,3	81,8	93,3	107	120	137	149
	[64,7-77,9]	[74,2-89,5]	[84,1-103]	[95,1-120]	[104-137]	[112-162]	[116-182]
Station de Natitingou	62,6	69,2	76,4	85,6	94,4	106	114
	[58,7-66,5]	[64,4-73,9]	[70,5-82,4]	[78-93,3]	[85-104]	[94,1-117]	[101-128]

On retient de l'analyse du tableau 4 que les durées de retour au niveau des hauteurs maximales de pluie varient de 2 à 100 ans selon la quantité des hauteurs de pluie maximales journalières. Il ressort que les inondations pluviales les plus fréquentes et pouvant survenir chaque 2 ans et 3 ans ont une hauteur de pluie maximale journalière respectif de 64,7 mm et 89,5 mm au niveau de la station de Tanguiéta. Au niveau de la station de Natitingou ces hauteurs de pluies journalières sont de 62,6 mm pour une probabilité de 2 ans et 69,2 pour la probabilité de 3 ans. De même, celles ayant une chance sur 5 ans de se produire ont une hauteur de pluie maximale journalière de 93,3 mm à la station de Tanguiéta et de 76,4 mm pour celle de Natitingou. Par ailleurs, les inondations pluviales pouvant survenir chaque 100 ans ont une hauteur de pluie maximale journalière comprise entre 101 mm et 182 mm dans l'ensemble du bassin béninois de la Pendjari.

Les pluies maximales dans le bassin sont donc marquées par une forte fréquence sur la série d'analyse et cela serait en partie responsable de l'augmentation de celle des débits maximaux du bassin.

3.2.2. Analyse fréquentielle des débits maximaux dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga

La fréquence d'occurrence des débits maximaux journaliers dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga est représentée par la figure 6.

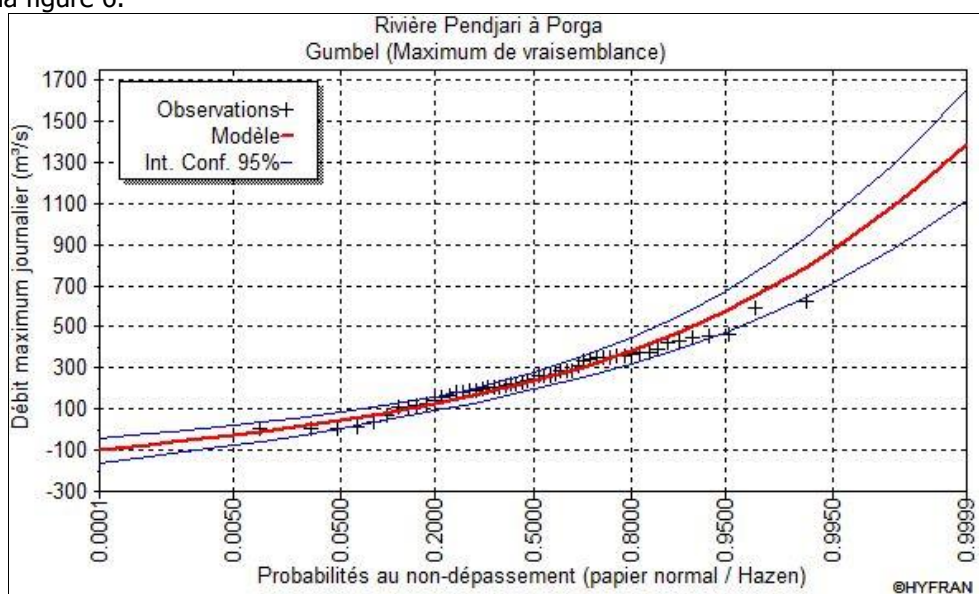


Figure 6 : Ajustement de la loi de Gumbel au débit maximal à Porga

L'analyse de la figure 6 montre que pour la probabilité au non-dépassement, les débits maximaux journaliers suivent non seulement le modèle, mais aussi ils sont bien ajustés avec la loi de Gumbel et le maximum de vraisemblance dans l'intervalle de confiance de 95 %.

Les récurrences des débits extrêmes sont également de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans et permettent de dire que le secteur d'étude peut être en proie à des crues exceptionnelles susceptibles d'occasionner des inondations qui ne seront pas sans conséquence sur le développement des activités des populations. Pour vérifier la fiabilité des résultats, l'application des tests d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité s'avère nécessaire. Ainsi, les débits ont été soumis à ces différents tests statistiques. Le tableau 5 présente les résultats des tests statistiques d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité appliqués aux débits maximaux dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga.

Tableau 5 : Résultats des tests statistiques appliqués aux débits maximaux.

Station	Test d'indépendance		Test stationnarité		Test homogénéité	
Porga	U	P	K	P	W	P
	2,19	0,0285	2,26	0,0241	0,86	0,43

L'analyse des données du Tableau 5, permet de constater qu'à un niveau de signification de 5 %, l'ensemble les débits de pointe sur le bassin obéit aux exigences.

Ainsi, à partir de l'équation de la droite de Gumbel, les quantiles des débits maximaux ont été calculés pour différentes périodes de retour et leurs intervalles de confiance (Tableau 6).

Tableau 6: Estimation des débits caractéristiques et les intervalles de confiance par la loi de Gumbel à Porga

Récurrences	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Débits	250	375	444	500	562	602
maximaux	[201-291]	[328-423]	[389-498]	[435-565]	[478-647]	[499-704]

De l'analyse du tableau 6, il ressort que les débits journaliers maximums annuels qui permettent d'estimer les débits de crue ayant une probabilité de subvenir dans le bassin de la Pendjari au Bénin. Les débits maximaux compris entre 201 et 291 m³/s ont la possibilité de subvenir chaque deux ans. De même, ceux compris entre 328 et 423 m³/s peuvent subvenir chaque cinq ans et les crues décennales varient entre 389 et 498 m³/s. Enfin les inondations fluviales rares sont causées par les débits dont les périodes de retour sont situées entre 50 et 100 ans avec des valeurs allant de 478 à 704 m³/s. Partant de ces estimations, les inondations récurrentes dans le bassin béninois de la Pendjari sont causées par les crues dont les débits sont situées entre 201 et 291 m³/s. Ces différentes prévisions, si elles devraient se produire, seront très préjudiciables aux cultures vivrières dans le bassin.

En somme, l'analyse pluvio-hydrologique a permis de caractériser les modifications induites par la variabilité climatique sur le comportement hydrologique du bassin béninois de la Pendjari. Elle a par ailleurs permis de caractériser les aléas et les éventuelles périodes de retour des événements hydroclimatiques extrêmes susceptible de d'induire des risques hydroclimatiques.

4. DISCUSSION

Le bassin béninois de la Pendjari a enregistré 0,95 % d'années à humidité extrême, 6,60 % d'années à humidité forte, 36,80 % pour les années à humidité modérée, 40,57 % d'années à sécheresse modérée, 13,21 % d'années à sécheresse forte et 1,89 % d'années à sécheresse extrême. Une étude similaire a été menée par Ouorou-Barre (2004) dans le département de l'Atacora. L'auteur montre que le département de l'Atacora a enregistré, 17,08 % d'années très pluvieuses ; 10,67 % d'années pluvieuses ; 20,50 % d'années normales ; 27,34 % d'années sèches et 21,7 % années très sèches [22]. Les types d'années pluvieuses enregistrées sont hétérogènes d'une station à une autre. De même, l'analyse des résultats de l'indice pluviométrique standardisé faite par Djossou (2020) [9] dans le bassin béninois de la Pendjari montre qu'on a une dominance des années sèches bien remarquable entre la période (1988-1996), on note aussi que l'indice SPI entre cette période peut atteindre (-2,31), ce qui explique l'existence des années extrêmement sèches. Ce qui confirme les résultats de cette étude qui révèle que pour l'ensemble de la série 1965-2017, il y a eu une année (1968) d'humidité extrême et deux années (1978, 2015) de sécheresse extrême ce qui favorise l'existence de risques hydroclimatique dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga. D'autant plus que, les séquences sèches sont beaucoup plus fréquentes au niveau de la station de Natitingou où tous les mois de la saison agricole ont connus de séquences sèches comparativement à celle de Tanguiéta sur la période de 1965 à 2017. Toutefois, Djossou (2020) fait constater que le bassin versant de la Pendjari affiche une diminution des jours secs consécutifs, pente négative et inférieure à 0 et une significativité de 0,224 ce qui laisse présager une reprise pluviométrique qui ne sera pas sans conséquence sur la disponibilité de l'eau et sur les activités dans lesquelles sont impliquées les femmes [9].

Les résultats de cette étude montrent également que, les durées de retour au niveau des hauteurs maximales de pluie varient de 2 à 100 ans selon la quantité des hauteurs de pluie maximales journalières. Il ressort que les inondations pluviales les plus fréquentes et pouvant survenir chaque 2 ans et 3 ans ont une hauteur de pluie maximale journalière respectif de 64,7 mm et 89,5 mm au niveau de la station de Tanguiéta. Au niveau de la station de Natitingou ces hauteurs de pluies journalières sont de 62,6 mm pour une probabilité de 2 ans et 69,2 pour la probabilité de 3 ans. De même, celles ayant une chance sur 5 ans de se produire ont une hauteur de pluie maximale journalière de 93,3 mm à la station de Tanguiéta et de 76,4 mm pour celle de Natitingou. Koudamiloro (2017) obtient les résultats similaires le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou, mais avec des hauteurs de pluie inférieur à celles obtenus dans cette étude [23]. Il montre que, les hauteurs de pluie journalière de 39,2 mm ont une probabilité sur deux de se produire tous les deux ans sur le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. Dans le bassin béninois de la Pendjari à Porga, [9], avait souligné que, les pluies extrêmes varient entre 38,6 mm et 153,93 mm d'eau en 24 heures. La fréquence d'occurrence des minima (38,6 mm) varie entre 2 et 10 %. Quant aux maxima (153,93 mm en 24 heures), leur fréquence d'occurrence varie entre 15 et 30 %. Les valeurs extrêmes maximales ayant une fréquence d'occurrence supérieure à 2, il s'en suit qu'il y a une augmentation significative de 1,5 % de cette fréquence. Mais, les plus fortes fréquences sont enregistrées par les hauteurs de pluie supérieure à 70 mm. Or, selon Gret et Cirad (2006), au-delà de 50 mm de précipitation journalière et sur un terrain de pente > 2 %, on assiste aux forts risques d'inondation pouvant détruire les efforts des populations agricoles [24].

Par ailleurs, il ressort que les débits journaliers maximums annuels qui permettent d'estimer les débits de crue ayant une probabilité de subvenir dans le bassin de la Pendjari au Bénin. Les débits maximaux compris entre 201 et 291 m³/s ont la possibilité de subvenir chaque deux ans. De même, ceux compris entre 328 et 423 m³/s peuvent subvenir chaque cinq ans et les crues décennales varient entre 389 et 498 m³/s. Une étude similaire a été menée par [21], dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Il a montré que l'analyse fréquentielle des débits journaliers maximums annuels (1960-2010) a permis d'estimer la crue qui a une probabilité sur deux à 212 m³/s, la crue décennale à 333 m³/s et la crue cinquantennale à 440 m³/s dans le sous bassin versant de la Sota à l'exutoire de Coubéri. Dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire, la crue qui a une probabilité sur deux à 181 m³/s, la crue décennale à 302 m et la crue cinquantennale à 408 m³. Ces valeurs caractéristiques correspondent une moyenne des quantiles obtenus selon les différentes lois retenues. a Bechler-Carmaux et al., (2000) avaient estimé la crue décennale 2110 m³/s la crue cinquantennale 2340 m³ la crue centennale 2420 m³/s et la crue millénaire 2650 m³/s à Niamey sur le fleuve Niger [25].

5. CONCLUSION

Au terme de cette étude, il ressort que le bassin béninois de la Pendjari a enregistré, 57 % d'années à sécheresse modérée, 13,21 % d'années à sécheresse forte et 1,89 % d'années à sécheresse extrême. L'analyse moyenne de séquences sèches de 1965 à 2017 dans le bassin béninois de la Pendjari, a révélé que, les mois de mai et d'Octobre enregistrent plus de séquences sèches d'au moins 15 jours consécutifs. Ces mois coïncident avec le début et la fin des saisons pluvieuses et agricoles dans le bassin Béninois de la Pendjari. Aussi, il faut donc retenir que l'ajustement à la loi de Gumbel et la récurrence des pluies extrêmes laissent présager que les pluies à l'échelle des stations du bassin béninois de la Pendjari à Porga peuvent contribuer à une forte crue, voire exceptionnelle, occasionnant des dégâts dans le bassin. Ainsi, les inondations pluviales les plus fréquentes et pouvant survenir chaque 2 ans et 3 ans ont une hauteur de pluie maximale journalière respectif de 64,7 mm et 89,5 mm au niveau de la station de Tanguéta. Au niveau de la station de Natitingou ces hauteurs de pluies journalières sont de 62,6 mm pour une probabilité de 2 ans et 69,2 pour la probabilité de 3 ans. De même, les débits maximaux compris entre 201 et 291 m³/s ont la possibilité de subvenir chaque deux ans. De même, ceux compris entre 328 et 423 m³/s peuvent subvenir chaque cinq ans et les crues décennales varient entre 389 et 498 m³/s. Ces variables estimées peuvent constituer un important outil d'aide à la décision dans les processus de recherche des stratégies de lutte contre les événements hydroclimatiques extrêmes en générale et dans le bassin béninois de la Pendjari en particulier.

6. REFERENCES

1. GIEC, Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. 2007, (publié sous la direction de-). GIEC, Genève, Suisse, 103 p.
2. PNUE, Sécurité des moyens d'existence Changements climatiques, migrations et conflits au Sahel. 2011, ISBN : 978-92-807-3230-6, 112p.
3. Baron C, Traoré S, Philippon N . Overview of main challenges for early warning systems for food security in West Africa. Geophysical Research Abstracts 2010, (EGU2010-11845-1).
4. GIEC, Conclusion du cinquième Rapport d'évaluation sur l'évolution du climat. 2014, Island Press, Washington, 5p.
5. Sylla I ; Dieng M, et Faal J., Les systèmes d'information géographique participatifs (SIG-P) dans la gestion des ressources naturelles et la sécurité alimentaire en Afrique. Études de cas : Bénin, Kenya, Malawi, Rwanda, Sénégal, Tunisie. 2013, Enda LEAD Afrique Francophone, rapport technique final, 59p.
6. Kodja D. J., Indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest. Géographie. 2018, Thèse de Doctorat Unique, Université de Montpellier, 288p.
7. PANA (2008) Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques du Bénin (PANA-Bénin) Cotonou, janvier 2008 ; 158 p.
8. Idieti E. M., Les hydro-écorégions du Bassin de la Pendjari au Bénin : Analyse des déterminants socio-économiques et environnementaux de la dynamique des écosystèmes naturels. 2012, Thèse de doctorat de géographie. Université d'Abomey-Calavi 229 p.
9. Djossou M. D., Événements hydroclimatiques extrêmes et activités socio-économiques dans le bassin versant de la Pendjari à l'exutoire de Porga. 2020, Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 218 p.
10. Houndenou C., Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation, 1999. Thèse de doctorat de géographie, UMR 5080, CNRS « climatologie de l'espace tropical », Université de Bourgogne, centre de recherche de climatologie, Dijon, 341 p.
11. Le Barbe L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y., et Gualde R., Les ressources en eau superficielles de la République du Bénin. IRD/DH, Cotonou, (1993) 540 p.
12. Schwartz D., Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes. 2002. 4p éditions, Editions médicales, Flammarion, Paris, 314 p.
13. McKee, T.B., Doesken, N.J., et Kleist J., La relation entre la fréquence et la durée de la sécheresse et les échelles de temps. 1993, In: *Eighth Conference on Applied Climatology*. pp 17-22.
14. Institute of Hydrology., Low Flow studies 1980, " *Institute of Hydrology, Wallingford; Oxon, Ox10 8BB. In four volumes*. 96 p
15. OMM., Vocabulaire météorologique international. Secrétariat de l'Organisation Météorologique Mondiale, 1992, Ed. 2, No. 182, Genève, Suisse, 784 p.
16. ST-Hilaire A. Analyse fréquentielle des précipitations des stations de Montréal et Shawinigan. 2005, Rapport de recherche R832 de l'INRS-ÉTÉ, 23 p.
17. Totin V. S. H., Sensibilité des eaux souterraines du bassin sédimentaire du Bénin à l'évolution du climat et aux modes d'exploitation : stratégies de gestion durable. 2010, Thèse de Doctorat. Géoscience de l'Environnement et Aménagement de l'Espace, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 283 p.
18. Meylan P. et Musy A. Hydrologie générale : Analyse fréquentielle. 1999, *Annale revue hydrologie*. 19 p.
19. Kendall M.G., Ranks correlation Methods. 1962, Charles Griffin (3ème Ed.)
20. GAR, Réduction des risques de catastrophe : Révéler le risque, redéfinir le développement, 2011. Bilan mondial 2011
21. Koumassi D., H., Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de lasota à l'exutoire de couberi. 2014, Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 245p.
22. Ouorou-Barre I., Contraintes climatiques, pédologiques et production agricole dans l'Atacora (Nord-Ouest Bénin). 2004, Thèse de doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi ; Bénin. FLASH/ UAC. 241p.
23. Koudamiloro O., Vulnérabilité aux risques hydroclimatiques et stratégies d'adaptation des populations dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou (Benin). 2017, Thèse de Doctorat unique de géographie. Université Ouaga 1 PR Joseph Ki-Zerbo, 274p.
24. GRET et CIRAD, Mémento de l'agronome. 2006. Paris 1635 p
25. Bechler-Carmaux N., Mietton M., Lamotte M., Le risque d'inondation fluviale à Niamey (Niger). Aléa, vulnérabilité et cartographie. 2000, *Annales de Géographie*, 612, 176-187.



Cite this article: Ouassa Pierre, Ogoouwalé Romaric, et Koudamiloro Olivier. CARACTERISATION DES RISQUES HYDROCLIMATIQUES DANS LE BASSIN VERSANT BENINOIS DE LA PENDJARI A L'EXUTOIRE DE PORGA (AFRIQUE DE L'OUEST). *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2021; 12(6): 247-257.

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>