

Caractérisation Des Risques Hydroclimatiques Dans La Basse Vallée De L'Oueme Au Benin (Afrique De L'Ouest)

[Characterization of hydroclimatic risks in the lower valley of Oueme in Benin (West Africa)]

Sophiatou SEIDOU, Pierre OUASSA, Gervais A. A. ATCHADE, Expédit W. VISSIN

Laboratoire Pierre Pagney: Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, Bénin



Résumé - La basse vallée de l'Ouémé subit les effets des aléas hydroclimatiques qui affectent négativement les activités des populations. La présente recherche vise à caractériser les risques hydroclimatiques dans la basse vallée de l'Ouémé. La démarche méthodologique s'est consacrée à la caractérisation des aléas liés à la variabilité climatique et à la cartographie des secteurs exposés aux inondations dans le secteur d'étude. Pour ce faire, les données climatologiques (pluie, ETP), les données environnementales, le SIG appuyées par les observations de terrain et les investigations socio-anthropologiques ont été utilisées. Les diagrammes de Gumbel et de GEV réalisés montrent que les périodes de retour des inondations les plus fréquentes est de trois (03) ans et celles rares cinquante ans (50) ans. La fréquence des sécheresses varie à des degrés divers. Elle est de 1,92% pour les sécheresses extrêmes à 9,61 % pour les sécheresses fortes et 42,31 % pour les sécheresses modérées. 12 % de la superficie est faiblement vulnérables à l'inondation contrairement aux zones à forte et très forte vulnérabilité qui occupent respectivement 39 et 59 % de la superficie totale de la basse vallée de l'Ouémé. Par ailleurs, les zones à faible risque couvrent 10 % de la superficie totale de la basse vallée ; les zones à risque fort (moyen) couvrent 39 % et les zones à très fort risque couvrent 51 % de la superficie de la basse vallée de l'Ouémé. Cette figure 20 permet de dire également que les Communes des Aguégus, de Dangbo et de Bonou sont plus exposées au risque d'inondation que la Commune d'Adjohoun qui paraît être la moins exposée.

Mots clés - Basse vallée de l'Ouémé, Risques hydroclimatiques, caractérisation, cartographie.

Abstract - The lower Ouémé valley suffers from the effects of hydroclimatic hazards which negatively affect the activities of the populations. This research aims to characterize the hydroclimatic risks in the lower Ouémé valley. The methodological approach was devoted to the characterization of hazards linked to climatic variability and to the mapping of the sectors exposed to floods in the study area. To do this, climatological data (rain, FTE), environmental data, GIS supported by field observations and socio-anthropological investigations were used. The Gumbel and GEV diagrams show that the most frequent return periods from floods are three (03) years and those rare fifty (50) years. The frequency of droughts varies in varying degrees. It is from 1.92% for extreme droughts to 9.61% for severe droughts and 42.31% for moderate droughts. 12% of the area is slightly vulnerable to flooding unlike the areas with high and very high vulnerability which occupies 39 and 59% respectively of the total area of the lower Ouémé valley. In addition, the low-risk areas cover 10% of the total area of the lower valley; the high (medium) risk areas cover 39% and the very high risk areas cover 51% of the area of the lower Ouémé valley. This figure 20 also makes it possible to say that the Communes of Aguégus, Dangbo and Bonou are more exposed to the risk of flooding than the Municipality of Adjohoun which seems to be the least exposed.

Keywords - Lower Ouémé valley, Hydroclimatic risks, characterization, mapping.

I. INTRODUCTION

Les variations climatiques et leurs impacts constituent aujourd'hui l'un des sujets les plus préoccupants pour la communauté scientifique internationale. En effet, Les changements climatiques, l'un des grands problèmes qui affectent aujourd'hui le cadre de vie de l'humanité, sont d'une telle importance qu'ils ont fait l'objet d'une convention-cadre des Nations Unies depuis 1992. Celle-ci impose que toutes les activités humaines (dont l'agriculture) soient désormais développées de manière à faire efficacement face à cette réalité. Notre climat est en train de changer et continuera à le faire en raison des niveaux de gaz à effet de serre déjà présents dans l'atmosphère. Déjà plus fréquents, les événements climatiques extrêmes tels que les canicules, les sécheresses et les inondations entraînent de graves conséquences sociales, économiques et écologiques. Les moyennes mondiales de température augmenteront probablement de plus en plus si de nombreuses activités humaines ne modifient pas considérablement leurs émissions de gaz à effet de serre [1].

Selon le [2], 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. Les personnes marginalisées sur le plan social, économique, culturel, politique, institutionnel ou autre sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques.

Ainsi, de tous les défis adressés aux pays africains, la gestion des ressources naturelles (GRN) constitue l'un des plus costauds. 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 [3].

Il est donc indéniable de comprendre que même si le risque d'inondation est principalement associé à une accentuation de la vulnérabilité des établissements humains, surtout les populations vivant de l'agropastoralisme, l'intensification des précipitations au cours de ces dernières années reste le facteur déclenchant les événements extrêmes dévastateurs dans les bassins versants [4, 5]. Or, ces milieux constituent en raison de leurs potentialités le lieu par excellence de la production agricole qu'exploitent par exemple au Bénin plus de 52 % de sa population avec une part de plus de 32 % dans le Produit Intérieur Brut [6].

Le Bénin subit durement les effets néfastes des changements climatiques. Il fait partie des pays les moins avancés qui par ailleurs sont très vulnérables aux changements climatiques en raison des ressources très limitées dont ils disposent pour faire face aux défis du développement et aux chocs climatiques. Ceci n'est pas sans conséquence sur la population surtout dans les régions situées dans les plaines d'inondation de grands systèmes fluviaux du Bénin comme la basse vallée de l'Ouémé. Elle est située entre 6°24' et 6°52' de latitude nord et entre 2°24' et 2°38' de longitude est (figure 1).

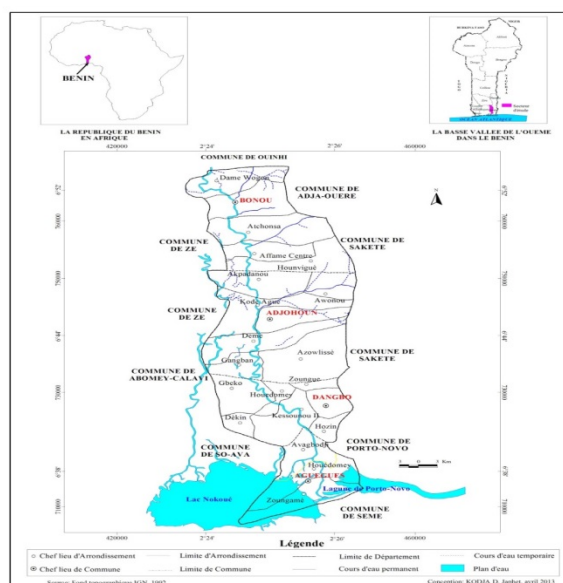


Figure 1 : Situation géographique de la basse vallée de l'Ouémé au Bénin

II. DONNEES ET 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 la vallée de l'Ouémé et à proximité sur la période 1960-2015 et les températures maximales et minimales (mensuelles) de la station synoptique de Cotonou obtenus à Météo-Bénin.
 - des données hydrométriques (débits journaliers et mensuels) sur la période 1960-2015) 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 Schwartz (2002). Ainsi, elle a été calculée avec un degré de confiance de 95 % soit une marge d'erreur de plus ou moins 5 %.

$$N = \frac{Z\alpha^2 PQ}{d^2}$$
 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 345 personnes ont été interviewées et sont réparties comme suit : Adjohoun (101), Aguégus (63),

Bonou (61) et Dangbo (120). Les méthodes utilisées pour caractériser les risques hydroclimatiques dans le cadre de ce travail sont essentiellement statistiques.

2.2.1. Méthode de caractérisation des risques hydroclimatiques dans la basse vallée de l'Ouémé

L'étude des risques hydroclimatiques peut se faire par plusieurs méthodes. L'approche cartographique a été utilisée dans ce travail. La cartographie des risques hydroclimatiques (inondation et sécheresse) prend en compte de nombreux paramètres comme le montre l'équation du risque [7, 8]:

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

A = aléa, E = enjeux ou éléments à risque, V = vulnérabilité, I = résilience, t et s = dimensions spatio-temporelles.

Le risque est exprimé selon United Nations Disaster Relief Office (UNDRO) par le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité ([9] et [8]) (Gilard et Gendreau, 1998 et Henri, 2005) :

Risque = Aléa * Vulnérabilité

Pour l'évaluation du risque d'inondation ou de sécheresse, les variables définies sont entre autres : la densité de drainage, la géologie, le domaine structural, le drainage souterrain, la pente, la perméabilité induite par le réseau de fracture, le type d'occupation du sol, la température du sol, et l'intensité pluviométrique, etc. Le risque hydroclimatique dans cette étude résulte de la combinaison de la vulnérabilité et de l'aléa.

2.2.2. 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 [10] 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 [11].

➤ 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 I) à partir de l'équation suivante : $SPI = (pi - pm)/\sigma$

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

Tableau I : 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) ont été calculées, 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. Pour cela, la définition d'un seuil de hauteur de précipitations à partir duquel on peut considérer que le jour est sec est nécessaire. Le seuil choisit est 0,83 mm [12].

2.2.3. 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 de la basse vallée de l'Ouémé au Bénin. 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 [13]. 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 [13].

➤ 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]. 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 la basse vallée de l'Ouémé. Pour cela, la série des hauteurs maximales de pluie a été constituée. Pour estimer les pluies maximales et 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 [13]. Les hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité sont vérifiées. L'hypothèse d'indépendance a été validée à l'aide du test de Wald-Wolfowitz [16]. Les tests d'homogénéité et de stationnarité utilisés sont respectivement ceux de [17] et de [18]. L'ensemble des étapes méthodologiques est accompli à l'aide du logiciel HYFRAN (2003).

Justification de la loi utilisée et leurs caractéristiques

- Loi de Gumbel

La loi statistique qui ajuste mieux les différentes séries de pluie est le Gumbel [19, 20, 21, 22 et 23]. 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 :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b}\right)\right) \text{ avec la variable réduite suivante : } U = \frac{x-a}{b}$$

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 :

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

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.

- **Loi GEV**

En probabilité et statistique, la loi d'extremum généralisée (en anglais : Generalized Extreme Value ou GEV) est une famille de lois de probabilité continues qui servent à représenter des phénomènes de valeurs extrêmes (minimum ou maximum). Elle comprend la loi de Gumbel, la loi de Fréchet et la loi de Weibull, respectivement lois d'extremum de type I, II et III. Le théorème de Fisher-Tippett-Gnedenko établit que la GEV est la distribution- limite du maximum (adéquatement normalisé) d'une série de variables aléatoires indépendantes de même distribution.

L'ajustement d'une loi de distribution à un échantillon de données consiste, une fois le type de loi choisi, à estimer les paramètres de la loi de telle sorte que l'échantillon soit le plus vraisemblable possible (au sens du maximum de vraisemblance) ou qu'au moins certaines statistiques de l'échantillon (moyenne, variance par exemple) correspondent le mieux possible à celles de la loi.

2.3 Méthode de cartographie du risque d'inondation

2.3.1. Cartographie de l'aléa d'inondation

L'identification de l'aléa est la première phase essentielle de l'élaboration de la cartographie des risques [24]. Deux paramètres sont retenus pour cartographier l'aléa. A partir des données de précipitations (1960 - 2011), la carte des isohyètes est établie. Trois classes de pluviosité sont définies : faible (< 850 mm), forte ($850 - 1200$ mm) et très forte (> 1200 mm). Le deuxième paramètre est la couverture du sol, qui retient une proportion variable de la pluie au cours d'une précipitation. En prenant en compte le rôle des différentes classes d'occupation de sol [25] dans la production des écoulements de surface, une classification est réalisée et a permis de retenir trois classes : rôle faible (forêt dense semi-décidue et plantation), rôle fort (champs et jachères), très fort (agglomérations, formations marécageuses et plan d'eau).

Le croisement de ces deux facteurs (pluviosité et couverture du sol) a permis de cartographier l'étendue spatiale et les zones potentiellement exposées aux aléas climatiques pouvant engendrer des inondations dans le bassin.

2.3.2. Cartographie des zones vulnérables à l'inondation

Les variables nécessaires à la détermination de la vulnérabilité sont de plusieurs types, car l'action combinée de plusieurs facteurs provoque les inondations [26]. Le traitement des données relatives à la vulnérabilité du bassin à l'inondation a permis de dresser des cartes thématiques. La première des cartes est celle des pentes, réalisée sur la base du MNT ASTER V2. Le MNT utilisé est extrait du modèle numérique de terrain global de l'Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace des Etats Unis [27]. La résolution de ce MNT est de 30 m.

La seconde carte est celle de densité de drainage. Ainsi, trois classes de densité sont définies. Il s'agit de faible, forte et très forte. Les deux dernières cartes sont des cartes de zone d'influence des principaux cours d'eau du bassin et celle des ensembles géologiques du bassin.

La combinaison de ces facteurs dans le SIG permet l'élaboration de la carte de vulnérabilité du bassin à l'inondation. La carte de pente obtenue montre que, dans la zone d'étude, les pentes varient de 0 à plus de 50 %. Ces valeurs montrent que la zone d'étude est par endroits très accidentée. L'organisation de ces pentes en trois classes : faible (≤ 5 %), forte ($5 \leq 10$ %), très forte (≥ 10 %), a permis de mieux cerner les zones vulnérables à l'inondation.

2.3.3. Cartographie des zones à risque d'inondation

Selon [28], les cartes sont des outils particulièrement performants pour l'étude des risques naturels. Les données d'observation de la Terre constituent un puissant outil de surveillance des phénomènes d'inondation [29], car elles permettent d'identifier les zones affectées, mais aussi peuvent aider à la mise en place de plans de prévention des risques [30, 31 et 32]. Pour obtenir la carte du risque d'inondation par débordement, la superposition des cartes de vulnérabilité et de l'aléa a été faite. Un aléa d'inondation fort dans une zone faiblement vulnérable est fortement risqué.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

L'analyse des risques hydroclimatiques permet une meilleure compréhension des impacts de la variabilité et du changement climatiques sur les principaux moyens d'existence et activités sur un territoire. Selon le rapport sur Programme d'Action National

d'Adaptation aux Changements Climatiques au Bénin (PANA-Bénin) en 2008, les inondations, les épisodes de sécheresse, les pluies tardives et violentes, les chaleurs excessives sont les principaux risques hydroclimatiques majeurs au Bénin.

3.1. Analyse du risque d'inondation dans la basse vallée de l'Ouémé

Dans son contexte général, L'aléa constitue un phénomène, une manifestation physique ou une activité humaine susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement [33]. Selon [34], l'aléa « est une menace caractérisée par des propriétés physiques et une probabilité d'occurrence ». De façon globale l'aléa hydrométéorologique est donc caractérisé par :

- sa probabilité d'occurrence temporelle (estimée par la période de retour) et spatiale (influencée par la climatologie mais également par la topographie, l'occupation du sol et la pédologie qui contrôlent la susceptibilité des territoires à l'inondation) ;
- son intensité, mesurée par la pluie maximale sur une certaine durée, par le débit maximal atteint dans le cours d'eau ;
- sa localisation (extension géographique des précipitations, portions du réseau hydrographique affectées par la crue) ;
- sa durée (durée des précipitations, durée de la crue).

Dans la présente étude, la détermination de l'aléa est faite par l'analyse fréquentielle des hauteurs de pluies maximales et des débits de pointe dans la basse vallée de l'Ouémé.

3.1.1. Détermination de l'aléa pluviale d'inondation dans la basse vallée de l'Ouémé

Pour l'aléa pluviométrique, les précipitations maximales, représente le premier facteur déclenchant des mécanismes de crue et d'inondation. Après l'application des lois d'ajustement sur les hauteurs de pluies maximales, seule la loi de Gumbel s'adapte le mieux aux pluies maximales journalières. Plusieurs méthodes existent pour ajuster les distributions statistiques aux échantillons. La méthode maximum de vraisemblance a été utilisée dans la présente étude pour ajuster les séries aux lois retenues (figure 2).

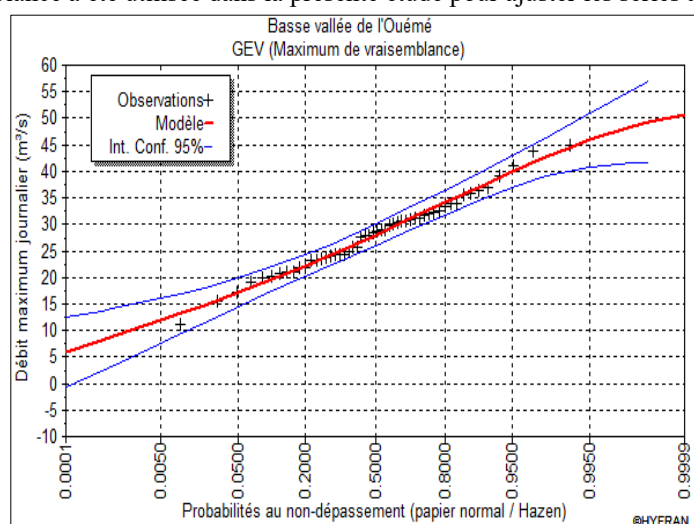


Figure 2 : Diagramme de GEV appliqué aux hauteurs pluviométriques journalières

Il ressort de l'analyse de la figure 2 que les pluies extrêmes ont tendance à mieux s'ajuster à la loi de GEV 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 [13]. Ainsi, les hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité ont été vérifiées. L'hypothèse d'indépendance a été validée à l'aide du test de [16]. Les tests d'homogénéité et de stationnarité utilisés sont respectivement ceux de [17] et de [18] (tableau II).

Tableau II : Résultats des tests statistiques appliqués aux précipitations maximales

Station	Test d'indépendance		Test stationnarité		Test homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
	0,0440	0,965	0,513	0,608	1,26	0,208

On retient de l'analyse des résultats de ce tableau II que, les séries pluviométriques maximales journalières sont indépendantes, homogènes et stationnaires dans la basse vallée de l'Ouémé.

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 III).

Tableau III: Quantiles de pluies et les périodes de retour dans la basse vallée de l'Ouémé

Périodes de retour	2 ans	3 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
BVO	27,2	30,8	34,8	39,9	44,8	51	55,8
	25-29,3	28,2-33,5	31,5-38,2	35,6-44,2	39,5-50	44,5-57,6	48,3-63,3

On retient de l'analyse du tableau III 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 ayant une période de retour de 2 ans et 3 ans ont une hauteur de pluie maximale journalière comprise entre 25 mm et 33,5 mm. Celles ayant une période de retour de 5 ans ont une hauteur de pluie maximale journalière comprise entre 34,8 mm et 38,2 mm. Par ailleurs, les inondations pluviales pouvant survenir chaque 100 ans ont une hauteur de pluie maximale journalière comprise entre 55,8 mm et 63,3 mm.

En somme, les inondations pluviales récurrentes observées dans la basse vallée de l'Ouémé sont causées par des hauteurs de pluie maximales journalières situées entre 25 et 38,2 mm. De même, les inondations pluviales rares c'est-à-dire celles dont les périodes de retour sont compris entre 20 et 50 ans sont entre 44,8 et 57,6 mm. Les inondations pluviales exceptionnelles sont quant à elles causées par les pluies maximales journalières dont les hauteurs sont situées entre 55,8 et 63,3 mm.

3.1.2. Détermination de l'aléa d'inondation fluviale dans la basse vallée de l'Ouémé

La réalisation du diagramme de GEV à la station hydrométrique de Bonou (figure 3), confirme la configuration des hauteurs maximales de pluies.

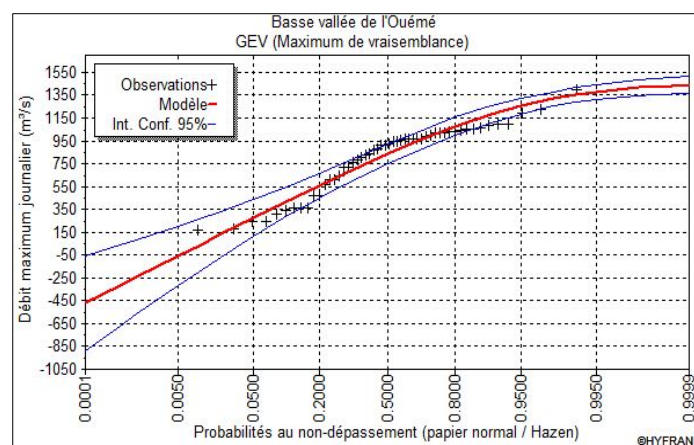


Figure 3: Diagramme de GEV/ station hydrométrique de Bonou

L'analyse de la figure 3 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 GEV et le maximum de vraisemblance dans l'intervalle de confiance 95 % voire 99 %.

L'une des exigences de l'analyse fréquentielle des variables hydro-climatologique est l'indépendance, la stationnarité et l'homogénéité des données. Ainsi, les hypothèses d'indépendance, homogénéité et stationnarité ont été vérifiées. Le tableau IV présente les résultats des tests statistiques d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité appliqués aux débits maximaux dans la basse vallée de l'Ouémé.

Tableau IV : Résultats des tests statistiques appliqués aux débits maximaux

Station	Test d'indépendance		Test stationnarité		Test homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
	2,83	0,00470	1,68	0,0928	1,40	0,162

L'analyse des données du Tableau IV, 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 GEV, les quantiles des débits maximaux ont été calculés pour différentes périodes de retour et leurs intervalles de confiance (Tableau V).

Tableau V : Estimation des débits caractéristiques et les intervalles de confiance par la loi de GEV

Périodes de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
BVO	833 746- 921	1070 994- 1160	1180 1150- 1250	1250 1180- 1320	1320 1260- 1380	1350 1320- 1440

De l'analyse du tableau V, il ressort que les inondations fluviales fréquentes sont causées par les crues dont les débits de pointe se situant entre 746 et 1160 m³/s. c'est-à-dire les débits dont les périodes de retour qui se situent entre 2 et 5 ans. De même, les crues responsables des inondations fluviales moyennes ont des débits situés entre 1150 et 1320 m³/s. Et 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 1260 à 1440 m³/s. Partant de ces estimations, les inondations récurrentes dans la basse vallée de l'Ouémé sont donc causées par les crues dont les débits sont entre 746 et 921 m³/s.

En somme, l'analyse pluvio-hydrologique a permis de caractériser les modifications induites par la variabilité climatique sur le comportement hydrologique de la basse vallée de l'Ouémé. 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.

3.2. Cartographie du risque d'inondation dans la basse vallée de l'Ouémé

La figure 4 montre les zones vulnérables aux inondations dans la basse vallée de l'Ouémé.

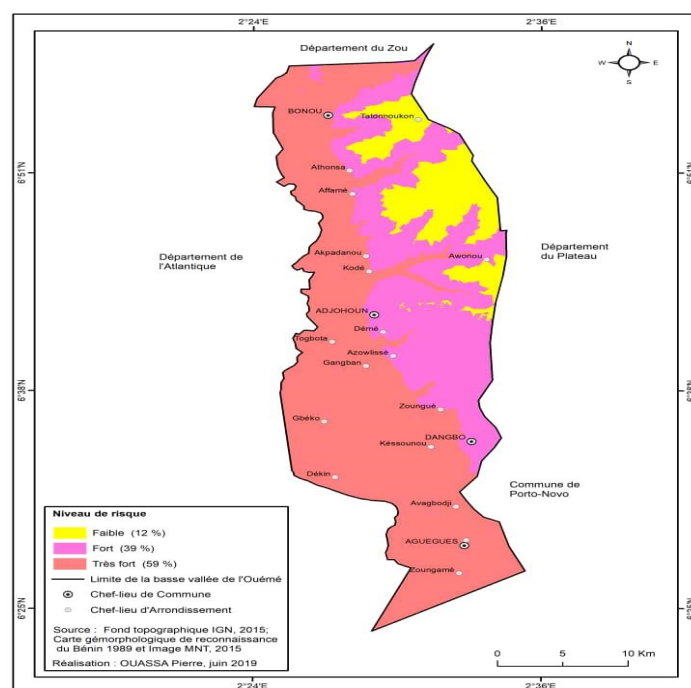


Figure 4 : Niveau de vulnérabilité aux inondations dans la basse vallée de l'Ouémé

Il faut retenir de l'analyse de la figure 4 que 12 % de la superficie est faiblement vulnérables à l'inondation contrairement aux zones à forte et très forte vulnérabilité qui occupe respectivement 39 et 59 % de la superficie totale de la basse vallée de l'Ouémé. La carte de l'aléa d'inondation est présentée par la figure 5.

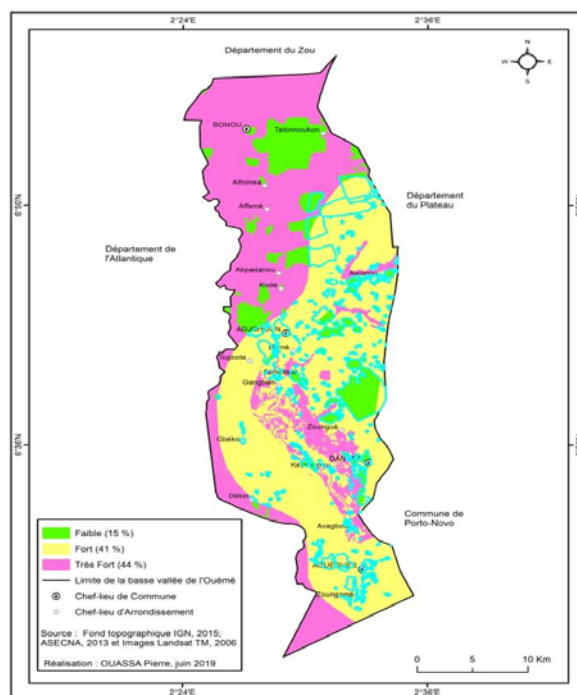


Figure 5 : Aléa d'inondation dans la basse vallée de l'Ouémé

L'occurrence et l'intensité des pluies, paramètres naturels qui ne sont pas maîtrisables, quelles que soient les dispositions de prévention, sont les paramètres prépondérants de l'inondabilité. Trois classes de pluviosité sont définies : faible (850-1200 mm) ; moyen (1200-1500 mm) et fort (1500-1750 mm).

Ainsi, il ressort de l'analyse de la figure 19 que la zone à faible aléa occupe 15 % de la superficie de la basse vallée. Les zones à aléa fort représentent 41 % de la superficie du bassin tandis que l'aléa très fort occupe le reste de la basse vallée soit 44 % de la superficie. Notons que, les unités d'occupation du sol retiennent une proportion variable de la pluie au cours d'une averse. Les agglomérations, les formations végétales interceptent une partie de la pluie et exercent une action limitatrice importante sur le ruissellement superficiel. Elle régularise le débit des cours d'eau et amorti les crues de faible et moyenne amplitudes.

La résultante de la carte des aléas et celle de la vulnérabilité a permis de cartographier la carte des zones potentiellement à risque d'inondation dans la basse vallée de l'Ouémé. La figure 6 présente les secteurs à risque hydroclimatiques dont l'inondation dans la basse vallée de l'Ouémé.

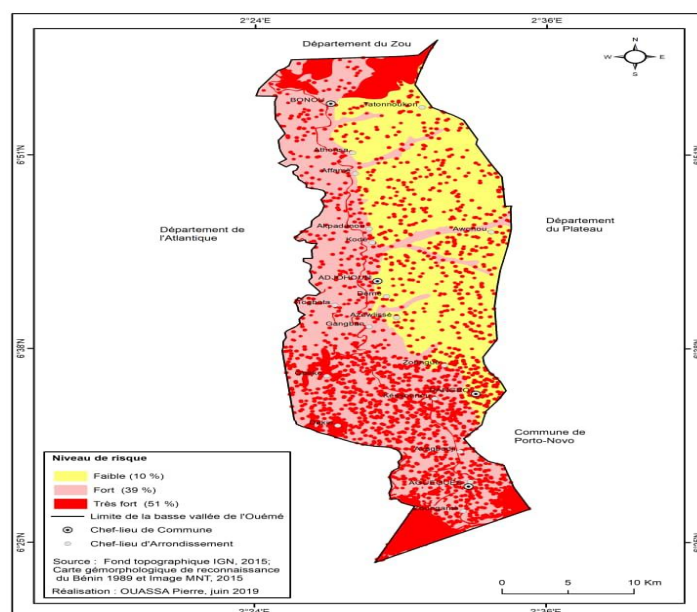


Figure 6 : Secteurs à risque d'inondation dans la basse vallée de l'Ouémé

L'analyse de la figure 6 révèle des secteurs à risque faible, fort et très fort aux inondations dans la basse vallée de l'Ouémé. Il faut retenir que les zones à faible risque couvrent 10 % de la superficie totale de la basse vallée ; les zones à risque fort (moyen) couvrent 39 % et les zones à très fort risque couvrent 51 % de la superficie de la basse vallée de l'Ouémé. Cette figure 20 permet de dire également que les Communes des Agoués, de Dangbo et de Bonou sont plus exposées au risque d'inondation que la Commune d'Adjohoun qui paraît être la moins exposée.

En somme, le risque d'inondation étant préalablement défini comme le croisement de l'aléa et la vulnérabilité, il faut donc retenir qu'un aléa d'inondation moyen dans une zone faiblement vulnérable est fortement risqué.

Ainsi, les zones prédisposées à l'inondation sont celles situées dans les secteurs de faible perméabilité et à pente faible, en contrebas des reliefs, où le réseau de drainage est dense (infiltration faible, concentration rapide des eaux). De plus le risque à l'inondation est aussi maximal aux abords immédiats des cours d'eau.

3.3. Caractérisation de la sécheresse

Différents types de sécheresse sont classiquement identifiés et peuvent être évalués sur différentes profondeurs temporelles selon les domaines d'application. On distingue classiquement 3 types de sécheresse : les sécheresses météorologiques liées à un déficit du cumul de précipitations, les sécheresses agricoles ou édaphiques concernant l'humidité moyenne des sols et les sécheresses hydrologiques liées aux débits des cours d'eau ou au niveau des nappes. 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 [35].

3.3.1. Caractérisation de la sécheresse météorologique

La sécheresse météorologique est due à la réduction naturelle de la pluviométrie sur une région donnée pendant une année ou sur plusieurs années successives. Souvent, elle est définie par l'écart entre la pluie annuelle et la pluie moyenne annuelle. Le tableau VI présente la fréquence de différentes classes de la sécheresse au cours de la période 1960-2015 dans la basse vallée de l'Ouémé.

Tableau VI: Fréquence de différentes classes de la sécheresse au cours de la période 1960-2015 dans la basse vallée de l'Ouémé

Sécheresse Modérée		Sécheresse Forte		Sécheresse Extrême	
Nombre	Fréquence	Nombre	Fréquence	Nombre	Fréquence
22	42,31 %	5	9,61 %	1	1,92 %

Il ressort de l'analyse du tableau VI, que la fréquence des sécheresses varie à des degrés divers. Elle est de 1,92 % pour les sécheresses extrêmes à 9,61 % pour les sécheresses fortes et 42,31 % pour les sécheresses modérées.

3.3.2. Séquences sèches

Les séquences sèches au cours de la période 1960-2011 se réfèrent à une absence totale des pluies sur plusieurs jours consécutifs, soit une séquence sèche d'au moins 10 jours consécutifs selon la recommandation en agroclimatologie.

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. La figure 7 montre le nombre moyen de séquences sèches de 1960 à 2015.

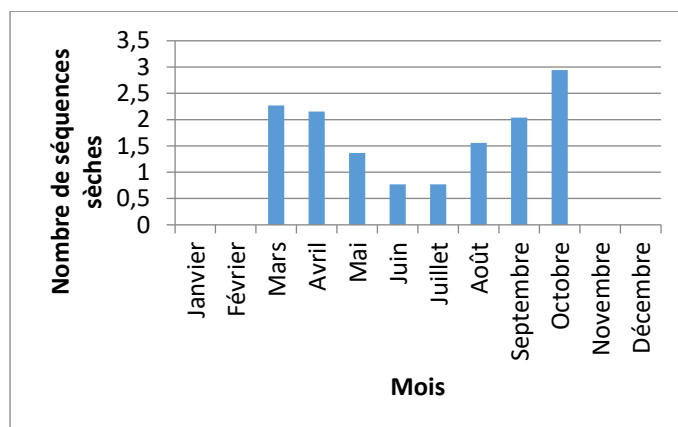


Figure 7 : Nombre moyen de séquences sèches de 1960 à 2015 dans la basse vallée de l'Ouémé

Il résulte de l'analyse de la figure 7 que les mois d'avril et d'Octobre enregistrent plus de séquences sèches d'au moins 10 jours consécutifs (2 à 3 séquences en moyenne). Ces mois coïncident avec le début et la fin des saisons pluvieuse et agricole dans la basse vallée de l'Ouémé. Ainsi d'après les populations rencontrées les séquences sèches se manifestent par l'assèchement brusque des sols (Photo 1).

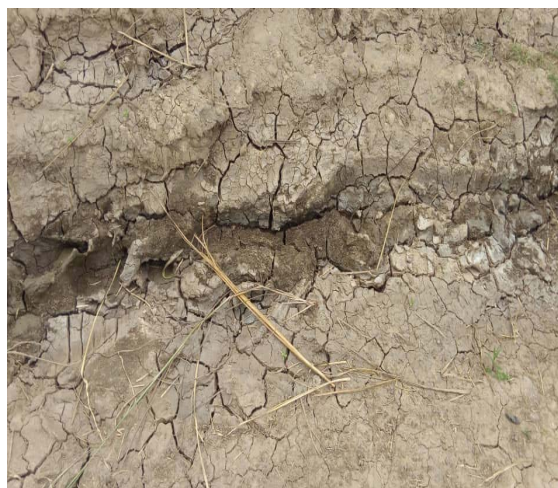


Photo 1 : Manifestation des séquences sèches dans la basse vallée de l'Ouémé
Prise de vue : Ouassa, juillet 2019

Cette photo 1 montre l'assèchement du sol en pleine saison pluvieuse traduisant ainsi le déficit d'eau pour les cultures. Selon les dires de 62 % des populations, cette situation est beaucoup plus fréquente pendant les mois de juin et juillet. Or selon eux, c'est au cours de ces mois que la plupart des cultures amorcent leur phase de croissance, ce qui empêche donc le bon rendement de celles-ci.

IV. CONCLUSION

Au terme de cette étude, il faut retenir que les diagrammes de Gumbel et de GEV réalisés montrent que, les inondations pluviales récurrentes observées dans la basse vallée de l'Ouémé sont causées par des hauteurs de pluie maximales journalières situées entre 25 et 38,2 mm avec des périodes de retour respectif de 2 ans et 3 ans. De même, les inondations fluviales fréquentes sont causées par les crues dont les débits de pointe se situant entre 746 et 1160 m³/s, c'est-à-dire les débits dont les périodes de retour qui se situent entre 2 et 5 ans. L'étude a également montré que la fréquence des sécheresses varie à des degrés divers. Elle est de 1,92 % pour les sécheresses extrêmes à 9,61 % pour les sécheresses fortes et 42,31 % pour les sécheresses modérées. L'analyse du moyen de séquences sèches de 1960 à 2015 dans la basse vallée de l'Ouémé a révélé que les mois d'avril et d'Octobre enregistrent plus de séquences sèches d'au moins 10 jours consécutifs (2 à 3 séquences en moyenne).

REFERENCES

- [1] Commission sur l'Agriculture Durable et le Changement Climatique (2011) : Atteindre la sécurité alimentaire dans le contexte du changement climatique. Résumé de la Commission sur l'Agriculture Durable et le Changement Climatique à l'attention des décideurs politiques. 20p.
- [2] GIEC (2014) : Conclusion du cinquième Rapport d'évaluation sur l'évolution du climat, 5p.
- [3] Sylla Ibrahima, Dieng Mbaye et Faal Jojob (2013) : 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. Enda LEAD Afrique Francophone, rapport technique final, 59p.
- [4] Koumassi Dègla Hervé (2014) : Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de lasota à l'exutoire de couberi. Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 245p.
- [5] Amoussou Ernesta, Totin V. S. Henri, Allagbé Simonc, Kodja Japhet, Akognongbé S. J. Arsène, Sohoun Brice, Vissin Expédit Wilfrid, Boko Michel, Houndénou Constant et Mahé Gil (2015) : Péjoration climatique et dynamique hydroécologique dans le bassin-versant du fleuve Ouémé à Bonou au Bénin, XXVIII^e Colloque de l'AIC, Liège, 32p.
- [6] Hounkanrin Barnabé (2015) : Mise en valeur agricole de la vallée de l'Ouémé dans la Commune de Bonou : diagnostic et trajectoire. Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 275 p.
- [7] 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.
- [8] Totin V. S. H. (2005) : Tendances hydroclimatiques et scénarios de gestion des ressources en eau sur les plateaux du Sud Bénin. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, LECREDE/EDP/FLASH/ UAC, 83 p.
- [9] Gendreau N., Longhini M., Combe P.M. (1998) : Gestion du risque d'inondation et méthode Inondabilité : une perspective socio-économique. Ingénieries eau-agriculture-territoires, Lavoisier ; IRSTEA ; CEMAGREF, 15 p.
- [10] McKee Thomas, Doesken Nolan and Kleist John (1993.) : The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceeding of the 8th conference of applied climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, CA. American hydrological Society, 179-184.
- [11] Aghrab A. (2003) : Caractérisation de la sécheresse et élaboration des indicateurs climatiques pour son alerte précoce dans la région du Sais. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès, Maroc, 64 p.
- [12] Stern R, Knock J, Rijks D, Dal I (2006) : InStat + for windows. Version 3.30. An interactive Statistics Package. Reading: University of Reading UK, 2006, 40 p.
- [13] Meylan et Musy (1999) : Hydrologie générale : Analyse fréquentielle. Annale revue hydrologie. 19 P.
- [14] OMM (1983) : Guide des Pratiques Hydrologiques - Vol. II : *Analyse, prévision et autres applications*. Organisation Météorologique mondiale. Publi. N° 168 Genève, Suisse.
- [15] Totin Henri (2010) : Sensibilité des eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier du Bénin à l'évolution du climat et aux modes d'exploitation : Stratégies de gestion durable. Thèse de Doctorat nouveau régime, EDP/FLASH, 234.

- [16] Wald A. et Wolfowitz J. (1943) : An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. The Annals of Mathematical Statistics, 14(4), 378-388.
- [17] Wilcoxon (1945) : "Individual comparisons by ranking methods", Biometrics, 80-83p.
- [18] Kendall M.G (1975) : «Rank Correlation Methods" Charles Griffin, London ,p. 35.
- [19] Slimani M. (1985) : Etude des pluies de fréquence rare à faibles pas de temps sur la région Cévennes-Vivarais : estimation, relation avec le relief et cartographie synthétique, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 299 pages.
- [20] Masson J.M. et Lubès H. (1991) : Méthodes des moments de probabilité pondérés: application à la loi de Jenkinson. *Hydrologie Continentale* Ed. ORSTOM 6(1), 67-84.
- [21] Hubert P., Bendjoudi H., Schertzer D., et Lovejoy, S. (1998) : A multifractal explanation for rainfall intensity-duration-frequency curves. In Proceedings, 93 p.
- [22] Goula B. T. Konan A., Brou T., Issiaka Y., Fadika S. V. et Srohourou, B. (2007) : Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale: cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois lognormale et de Gumbel. *Hydrological sciences journal*, 52(1), 49-67.
- [23] Kodja D. J. (2013) : Etudes des risques hydroclimatiques dans la vallée de l'Ouémé à Bonou. Mémoire de DEA de Géographie, EDP/FLASH/UAC. 108 p.
- [24] N'guessan Bi V. (2011) : Etude de l'impact de changement climatique sur les ressources en eau : application à l'analyse du risque d'inondation dans le département de Sinfra.(centre-ouest de la Côte d'Ivoire).Rapport final du projet individuel, 21E, 42p.
- [25] Saley M. B. et al. (2005) : Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire :apport des MNA et de l'Imagerie Satellitaire. *Télédétection* 4, 277-288.
- [26] Dia A.M., Kouame J., Wade S., Rudant J.P. (2006) : Application de la télédétection et du SIG aux risques de catastrophe naturelle: Etude de cas du projet de surveillance des crues du fleuve Sénégal (GESCAN). Communication et affiche à la Conférence internationale sur la réduction des catastrophes (IRDC) . Davos, Suisse, 27 août - 2 septembre 2006.
- [27] Available [On-Line] at :<http://www.gdem.aster.jp>
- [28] Meyer C., Geldreich P. et YESOU H. (2001): Apport des données simulées SPOT 5 pour l'évaluation des dégâts de tempête dans la forêt de Haguenau (Alsace, France) . Conférence SPOT 5 «vers de nouvelles applications», Toulouse 27-28 novembre 2001.
- [29] Puech C. et Lamachère J. (1995) : Télédétection et cartographie des états de surface. Communication aux neuvièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, Published 1995.
- [30] Marinelli L., Michel R., Beaudoin A. (1997) : Cartographie des crues à l'aide de l' image de cohérence en tandem ERS: une étude de cas dans le sud France. Dans le troisième Symposium ERS sur l'Espace au service de notre environnement , Florence, Italie, 17-21 mars 1997, p. 531-536.
- [31] Yésou P., Lethuillier C., Leclerc J. et Nisser J. (1999) : Avifaune nicheuse de l'île de Béniguet. *Bulletin mensuel de l'ONC*, 243 : 20-29.
- [32] Flouzat G., Puech C., Dartus D. (2003): Les observations par satellite pour l'analyse et le suivi du fonctionnement des hydro-systèmes, *Bulletin de la SFPT* , n ° 172 (2003-4), pp. 3-10.
- [33] Perretti W. (2001) : La société du risque, Paris : La Découverte, 55 p.
- [34] Gendreau F. (1999) : La population de l'Afrique : Manuel de démographie. Edition KARTHALA, CEPED, Paris, 463 p.
- [35] Sibou (2005) : Caractérisation hydro-climatique et agronomique de la sécheresse dans le bassin d'Oum Er Rbia. 105p. Encad: Tayaa, M; Ouassou, A. Cote 5952.