

# **Péjoration climatique et dynamique hydroécologique dans le bassin-versant du fleuve Ouémé à Bonou au Bénin**

**Amoussou Ernest<sup>a&b</sup>, Totin V. S. Henri<sup>a&b</sup>, Allagbé Simon<sup>c</sup>, Kodja Japhet<sup>b</sup>, Akognongbé  
S. J. Arsène<sup>b</sup>, Sohou Brice<sup>b</sup>, Vissin Expédit W.<sup>b</sup>, Boko Michel<sup>b</sup>, Houndénou Constant<sup>b</sup>,  
Mahé Gil<sup>d</sup>**

*<sup>a</sup>Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, BP 123 Parakou, Bénin. [ajernest@yahoo.fr](mailto:ajernest@yahoo.fr), [ernestamoussou@gmail.com](mailto:ernestamoussou@gmail.com), [sourouhenri@yahoo.fr](mailto:sourouhenri@yahoo.fr)*

*<sup>b</sup>Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin, 03 BP1122 Cotonou (Bénin). [bokomichel@gmail.com](mailto:bokomichel@gmail.com)*

*<sup>c</sup>Laboratoire de Biogéographie, Université d'Abomey-Calavi, BP 677 Abomey-Calavi, Bénin. [allagbeyemalin@gmail.com](mailto:allagbeyemalin@gmail.com)*

*<sup>d</sup>IRD, Laboratoire HydroSciences de Montpellier, Université de Montpellier 2, Case courrier MSE, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5-France. [gil.mahe@ird.fr](mailto:gil.mahe@ird.fr), [jean-emmanuel.paturel@ird.fr](mailto:jean-emmanuel.paturel@ird.fr)*

## **Résumé**

Le réchauffement global de la planète et les prévisions météorologiques relèvent un risque croissant des évènements climatiques qui ne sont pas sans conséquences sur le fonctionnement hydro-écologique du fleuve Ouémé. L'objectif de cette étude est d'analyser la répartition des précipitations et la dynamique hydro-écologique du bassin.

Les données utilisées sont les précipitations, l'ETP, les débits du fleuve Ouémé à Bétérou et à Bonou, les images Landsat TM de 1975 et 2010. La spatialisation des précipitations, la détermination du bilan climatique et des débits écologiques renseignent sur la dynamique de l'écosystème. La caractérisation des hydro-écorégions permettent apprécier le fonctionnement du bassin.

Les résultats obtenus montrent une inégale répartition des précipitations, marquée par une dégradation continue des conditions naturelles du bassin. La forte pression naturelle et anthropique altère les conditions de mise en valeur traditionnelle de cet écosystème. L'ensemble du bassin-versant est affecté par la dégradation des ressources naturelles engendrant une dégradation des eaux. Les débits écologiques ont permis de définir les périodes d'exploitation du bassin pour sa durabilité.

*Mots clés : Bénin, bassin-versant du fleuve Ouémé, péjoration climatique, hydro-écologie, hydro-écorégions.*

**Abstract: *Climate worsening and dynamic hydro-ecological in the catchment area of the Oueme -Bonou river basin in Benin***

The rivers are attractive environments of populations because they are full of enormous potential. They offer excellent technical and economic opportunities to earn a living easily as is the case in the lower valley of Oueme and Mono in Benin. But the global warming and weather forecasting come under a growing risk of extreme events (excess rain and temperature). These natural and human processes have implications for the capacity of production systems. This leads in many parts of the world especially in the Ouémé valley to the degradation of natural resources and therefore to the loss of biodiversity by water overflow (flooding) and human pressure, following the activities. The objective of this study is to analyze the distribution of rainfall, hydrological and ecological regions and its operation.

The data used are rainfall, ETP, flows the river Oueme Beterou and Bonou, planimetric data, land use extracted from Landsat TM and field. Rainfall spatial used to assess the spatial distribution of rainfall in the basin. The determination of hydro-ecoregions, in turn used to

characterize the spatial homogeneity of the pool and appreciate the life of the ecosystem Bonou. Determining environmental flows to Beterou Bonou and information on how to manage the ecosystem in order to preserve it in a context of global environmental changes.

The results show an uneven distribution of rainfall, marked by a continuous degradation of natural climatic conditions, particularly that determine the development of land in the lower valley. A strong natural and anthropogenic pressure alters the conditions of traditional development of this ecosystem. The entire watershed is affected by a process of natural resource degradation causing a erosive basin. This dynamic is due to overexploitation of the ecosystem without conservation management. In these fragile ecosystems conditions, restoring the morpho-dynamic balance through regeneration of vegetation cover is an imperative to prevent the spread of erosion and loss of biodiversity on the entire catchment-Basin.

***Key words:*** *Benin, Watershed Oueme river, climatic deterioration, hydro-ecology, hydro-ecoregions.*

## **1. Introduction**

Les changements climatiques sont considérés de nos jours comme l'une des menaces les plus graves posées au développement durable (GIEC, 2007). Certes, le climat varie, mais les concentrations accrues de rejets anthropiques de gaz à effet de serre dans l'atmosphère accentuent le changement observé, ce qui n'est pas sans conséquence sur les écosystèmes et en particulier sur les capacités des systèmes de production.

En Afrique et au Bénin en particulier, les grands fleuves comme le fleuve Ouémé subissent une forte pression démographique liée à leur situation géographique (Mama, 2010). De multiples activités anthropiques sont exercées le long de ces cours d'eau sans que l'on puisse clairement responsabiliser les différentes parties prenantes par une politique d'aménagement des bassins versants. Cela entraîne une dégradation des ressources naturelles et donc une perte de la diversité biologique. Ces effets pervers de la forte anthropisation sur les écosystèmes naturels associés aux risques hydro-climatiques amplifient dangereusement la dégradation écologique de nos cours d'eau indispensable pour la vie (Amoussou, 2010). Ainsi, les forts évènements climatiques extrêmes notés actuellement sont en partie l'une des conséquences des changements des états du couvert végétal et de la qualité des eaux dans nos bassins versants. Les régimes fluviaux enregistrent des variations interannuelles très sensibles avec pour corollaire les inondations et l'assèchement des lits (Amoussou, 2010 ; Kodja, 2013). Alors quel que soit le type d'évènement climatique (inondations ou sécheresses), la vie des écosystèmes n'est pas épargnée. Ces dernières années, le bassin de l'Ouémé à Bonou est confrontée à de fortes crues et des inondations qui ont entraîné des conséquences drastiques dont beaucoup de dégâts matériels, d'importantes pertes animales et de cultures maraîchères, de l'accès à l'eau et des maladies liées au débordement des eaux usées (Ahouansou 2008). De nombreuses études ont été réalisées sur la variabilité hydroclimatique dans le bassin (Le Lay, 2002 ; Séguis *et al.*, 2011 ; Zannou, 2011 ; Akognongbé, 2014 ; Abdoulaye, 2015) sans

aborder de façon objective son implication sur la dynamique écologique. Or, par exemple, la survenance des crues liée aux événements pluvieux extrêmes cause d'énormes dégâts à leur passage, dont la destruction des champs de cultures, des habitations, la dégradation précoce de l'environnement comme le ravinement des versants.

A cet effet, la dynamique hydro-écologique des cours d'eau, souvent très complexe dans un environnement de plus en plus anthropisé couplée à une récession climatique rend de plus en plus vulnérable les écosystèmes comme c'est le cas du fleuve Ouémé. L'objectif de cette étude est d'analyser la répartition des précipitations tout caractérisant la dynamique hydro-écologique du bassin de l'Ouémé à Bonou.

Situé sur le territoire béninois, le bassin de l'Ouémé à Bonou est précisément localisé entre 6°24' et 10°12' Nord et entre 1°30' et 3°00' Est (Le Barbé *et al.*, 1998) (figure 1). Il s'écoule du nord vers le sud où il crée dans sa partie aval une vallée très riche en minéraux organiques : la vallée de l'Ouémé, la 2<sup>ème</sup> la plus fertile au monde après le Nil. Son climat est déterminé par les centres d'action commandée par la circulation atmosphérique ouest-africaine (Le Lay, 2006). L'anticyclone de Sainte-Hélène, dans l'hémisphère sud, gouverne le flux de mousson et le dirige sur le Bénin. C'est ce qui explique les pluies de mousson qui peuvent précipiter une journée au lieu d'être réparties sur tout un mois. La mousson couvre ainsi tout le secteur d'étude aux mois de juillet, août et septembre, influençant ainsi la dynamique hydro-écologique de l'hydrosystème Ouémé.

**Figure 1** : Localisation du secteur d'étude

Du point de morphologique, le bassin de l'Ouémé à Bonou est couvert par des unités géomorphologiques constituées de plateaux culminant à quatre-vingts (80) mètres d'altitude, voire plus dans la partie amont et centrale du bassin et entaillées par des dépressions sèches et

humides et en aval par de vaste plaine d'inondation. Les plateaux sont couverts par une formation latéritique d'une grande perméabilité dans la partie aval et très imperméable dans la partie amont dominée par les sols ferrugineux en présence de forte pente.

## **2. Données et méthodes**

Les statistiques climatologiques : pluviométrie mensuelle de trente-six (36) répartie dans le bassin de l'Ouémé à Bonou et à proximité immédiat ont été utilisées et couvrent la période 1960-2011 et l'évapotranspiration potentielle (1965-2011 : période contrainte par l'indisponibilité des données d'ETP avant 1965) des stations synoptiques de Parakou et Bohicon ont été collectées à la Direction Nationale de la Météorologie (DNM) à l'ASECNA. Les données de ces deux stations ont permis de déterminer le bilan climatique respectivement à Bétérou et à Bonou pour apprécier la disponibilité des ressources en eau dans le bassin en domaine subsoudanien et subéquatorial. Les statistiques hydrométriques mensuelles de l'Ouémé à Bétérou et à Bonou sur la période 1960-2011 ont été tirées des bases de données du Service de l'Hydrologie de la Direction Générale de l'Eau à Cotonou.

Pour établir la relation entre pluie et débit, une interpolation spatiale des données de pluie (36 stations) est nécessaire. Cette spatialisation du champ de pluie du bassin a été réalisée en suivant quatre étapes :

- l'établissement d'un modèle spatial (un par mois) de régression linéaire multiple, liant les moyennes pluviométriques mensuelles des trente-six (36) stations à la latitude, à la longitude et à l'altitude (Modèle Numérique de Terrain STRM30). Cette méthode s'inspire de celle de Oettli (2008) et de Amoussou (2010) ;
- une interpolation cubique spline sous Matlab de l'information résiduelle, exprimée sous forme de ratios (rapport des pluies observées et estimées par le modèle de régression). Par

combinaison avec les estimations par régression linéaire multiple, les ratios interpolés permettent d'obtenir les précipitations moyennes mensuelles en tout point du bassin-versant ;

- une interpolation cubique des ratios interannuels, par combinaison avec les précipitations moyennes estimées par le modèle, permettant d'obtenir les précipitations de chaque année en tout point du bassin versant (champs pluviométriques interannuels) ;
- une validation croisée de type « leave-one-out » utilisée par Philippon (2002) et Amoussou (2010), qui fut développée par Lachenbruch et Mickey (1968) dans le cadre de recherches sur l'estimation de l'erreur de modèles d'analyse discriminante, a permis enfin de vérifier la fiabilité des données estimées. Cette méthode consiste à masquer tour à tour chacune des stations disponibles et à prévoir pour la station masquée les valeurs de pluie à partir des autres stations.

La détection des ruptures de stationnarité dans la série pluviométrique (1960-2011) a été faite à l'aide du logiciel Khronostat 1.01, à travers le test de Pettitt qui est un test non paramétrique dérivant de celui de Mann-Whitney. Ce test, par sa robustesse à détecter une rupture dans les séries chronologiques (figure 2), a été utilisé pour l'étude des fluctuations de variables hydrométéorologiques (Lubès *et al.*, 1994; Servat *et al.*, 1999). La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$ , définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}, \text{ où } D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) \text{ avec } \text{sgn}(x) = 1 \text{ si } x > 0, 0 \text{ si } x = 0 \text{ et } -1 \text{ si } x < 0$$

**Figure 2** : Rupture de stationnarité pluviométrique en 1968 dans le bassin de l'Ouémé Bonou de 1961 à 2011.

**NB :** a) Méthode de Ellipse de Bois (99 %) ; b) Méthode Bayésienne de Lee et Heghinian

A partir de la théorie des rangs, Pettitt montre que si  $k$  désigne la valeur  $K_N$  prise sur la série étudiée, sous l'hypothèse nulle, la probabilité de dépassement de la valeur  $k$  est exprimée approximativement par :

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp(-6k^2 / (N^3 + N^2)).$$

$H_0$  est rejetée pour un risque  $\alpha$  de première espèce donné, si la probabilité de dépassement estimée est inférieure à  $\alpha$ . La série comporte une rupture localisée au moment où est observé  $\max |U_{t,N}|_{t=1, N-1}$ .

Le test de segmentation de Hubert confirme la rupture de 1968 et subdivise la période en deux sous-périodes : 1960-1968 et 1969-2011 qui a fait objet de comparaison du point de vue hydroclimatique.

Les images Landsat TM de 1975 et 2010 ont permis la réalisation des cartes d'occupation du sol afin d'apprécier la dynamique spatiale du couvert végétal de l'hydrosystème Ouémé. En absence d'image dans la sous-période 1960-1968, c'est l'image de 1975, année plus proche de la sous-période qui a été utilisée.

La caractérisation des hydro-écorégions est réalisée à partir de la carte agroécologique du Bénin qui regroupe plusieurs variables biophysiques tels le relief, les aptitudes pédologique, pluviométrique, hydrographique, biogéographique et écologique du secteur d'étude. Les données sur les paramètres physico-chimiques utilisées sont ceux extraits des résultats de Akognongbé (2014). La confrontation de ces différentes données ont conduit à la catégorisation des espaces hydro-écorégions. Le débit écologique qui n'est rien d'autre qu'un dixième ( $1/10^{\text{ème}}$ ) du débit moyen annuel à chaque station hydrométrique (Bétérou et Bonou respectivement sous le climat subsoudanien et subéquatorial) est calculé pour apprécier l'état de l'écosystème et les périodes propices de leur exploitation.

### **3. Résultats et discussion**

#### **3.1. Evolution hydroclimatique**

La variabilité hydroclimatique, notamment hydropluviométrique en Afrique de l'Ouest en général et au Bénin voire dans le bassin versant du fleuve Ouémé en particulier, n'est plus à démontrer. Plusieurs études (Peugeot *et al.*, 2005 ; Le Lay, 2006 ; Kamagaté, 2006 ; Lawin, 2007 ; Totin *et al.*, 2007 et 2009 ; Vodounnon, 2008 ; Kodja, 2013) ont montré la variabilité climatique dans le bassin et son influence sur les ressources en eau sans aborder à fond son influence sur l'écologie, l'objet de cette étude.

La figure 3 présente en isohyète l'évolution spatiale des précipitations dans le bassin de l'Ouémé. Il ressort de l'analyse la figure 3 une pluviométrie qui varie de 1055 à 1238 mm dont la plus forte est enregistrée dans la basse vallée du secteur d'étude. Tandis que les plus faibles sont enregistrées au nord et au centre est du bassin. Cette variation des précipitations conditionne la dynamique de l'écosystème. Les quantités de pluies enregistrées dans le bassin montrent que ce dernier est bien arrosé, ce qui lui offre d'énormes potentialités en matière de ressources en eau.

**Figure 3 :** Evolution spatiale des hauteurs de pluie annuelle dans le bassin du fleuve Ouémé de 1960 à 2011

Une recherche de rupture de stationnarité montre une modification de l'évolution des précipitations dans le temps (figure 4). Ainsi, de 1969 à 2011, le bassin –versant de l'Ouémé a connu une baisse des précipitations de 16 % (226 mm) par rapport à la période humide (1960-1968), car on est passé de 1339 mm entre 1960-1968 à 1123 mm entre 1969-2011. Cette baisse des précipitations de 1969 à 2011 est amplifiée par les déficits marqués des décennies 1970 et 1980 (figure 5) comme l'on déjà démontré plusieurs chercheurs en Afrique de l'Ouest

(Fontaine et Janicot, 1993 ; Mahé et Citeau, 1993 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Paturel et Servat, 1996 ; Paturel *et al.*, 1998 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; Peugeot *et al.*, 2012), au Bénin (Boko, 1987 et 1988 ; Houndénou, 1999 ; Ogouwalé, 2006 ; Vissin, 2007, Amoussou, 2010) et dans le bassin de l’Ouémé (Le Lay, 2006 ; Totin *et al.*, 2007 ; Peugeot *et al.*, 2012 ; Kodja, 2013 ; Akognongbé, 2014).

**Figure 4:** Evolution annuelle des précipitations dans le bassin du fleuve Ouémé à Bonou de 1960 à 2011

**Figure 5:** Variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin du fleuve Ouémé à Bonou de 1960 à 2011

Cette modification significative (99 %) de l’évolution pluviométrique n’est pas sans conséquence sur l’évolution des écoulements de surface (figure 6) dans le bassin. La figure 6 qui présente l’évolution des débits moyens annuels sur la période 1960-2011 dans le bassin de l’Ouémé à la station hydrométrique de Bétérou et de Bonou montre également une modification de l’écoulement dans les deux stations. Ce changement dans l’évolution des écoulements de surface est plus amplifié que celui des précipitations. Ainsi, cette baisse de précipitation a induit une baisse des écoulements de 44 % (106,55 mm soit 40 m<sup>3</sup>/s) à Bétérou et de 40 % à Bonou (69 mm soit 102 m<sup>3</sup>/s).

Cette baisse des écoulements est conforme aux résultats obtenus par Le Lay (2006) ; de Kodja (2013) ; Akognogbé (2014) sur le bassin du fleuve Ouémé ; Vissin (2007) sur le bassin béninois du fleuve Niger ; Amoussou *et al.* (2012) sur le bassin du Mono et Totin *et al.* (2014) sur le bassin de la Pendjari.

Somme toute, au Bénin, les écoulements de surface ont une baisse marquée induit par les déficits pluviométriques et l'augmentation des températures au cours de ces dernières décennies.

**Figure 6:** Evolution annuelle des débits moyens dans le bassin du fleuve Ouémé à Bétérou et à Bonou de 1960 à 2011

Le bilan climatique (Pluie-ETP) en amont des stations hydrométriques de Bétérou et de Bonou comme l'illustre la figure 7 ont permis de comprendre que la forte évapotranspiration observée dans le bassin suite à l'action conjuguée de la péjoration climatique et de l'anthropisation poussée impactent négativement les ressources en eau du bassin.

**Figure 7:** Bilan climatique dans le bassin du fleuve Ouémé à Bétérou et à Bonou de 1965 à 2011

Il traduit une succession saisonnière d'excédents et de déficits en eau dans l'hydrosystème Ouémé. Ainsi, le climat devient sec quand les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle, et qu'il n'y a pas de réserve d'eau disponible (Hufty, 1976) dans le bassin. Le bassin versant de l'Ouémé est caractérisé par une période humide de quatre mois (juin à septembre) sur douze et une période sèche de huit mois (octobre à mai). Ces informations orientent vers les différents usages à développer dans le bassin dans le temps pour une durabilité des écosystèmes, car dans d'autre bassin comme le Mono, cette période humide est de cinq mois (Amoussou, 2010), donc le mode d'usage n'est pas le même d'un bassin à l'autre.

Cette disponibilité d'eau pluviale induit une dynamique hydrologique et par conséquent une dynamique écologique du fleuve l'Ouémé. Les ressources naturelles subissent ainsi les effets des changements environnementaux globaux (récession pluviométrique, pressions anthropiques croissantes) qui entraînent les dysfonctionnements des écosystèmes terrestres et aquatiques avec des pertes de biodiversité (Roche, 1998).

### **3.2. Dynamique écologique dans le bassin de l'Ouémé**

La figure 8 présente l'état de l'occupation des terres dans le bassin versant du fleuve Ouémé. L'analyse de cette figure 8 montre une dégradation spatiale des formations végétales surtout en amont de Bétérou. Les formations naturelles notamment les forêts denses et les galeries forestières ont diminué respectivement de 20 % et 40 % de 1975 à 2010 au profit des mosaïques de cultures et jachères qui ont trouvé leur superficie triplé voire quintuplé comme l'avait déjà signalé Abdoulaye (2015). Ceci pourrait expliquer le comblement progressif du Delta de l'Ouémé dû à l'érodibilité accrue des versants. Dans la basse vallée, il ressort une réduction très marquée du lit du fleuve Ouémé en 2010 comparativement en 1975 (confer l'encadrement rouge sur les cartes de l'état d'occupation des terres), confirmant ainsi, la forte anthropisation du bassin d'une part et la récession pluviométrique observée d'autre part. Cette dégradation de l'hydrosystème induit une diminution de 46 % d'eau et de 99 % de la formation de fourré dans le bassin. Cette augmentation des formations anthropiques au profit des formations naturelles confirme les résultats déjà obtenus par Kodja (2013) sur la basse vallée de l'Ouémé à Bonou et Akognongbé (2014) dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou.

**Figure 8** : Etat de l'occupation des terres en 1975 et en 2010.

Cette diminution de la quantité d'eau dans le bassin accentue les risques écologiques et socio-économiques (Frédéric, 2006). Ainsi, en période humide comme en période sèche, les paramètres physico-chimiques ont connu une variation très marquée dans le bassin selon les mesures prises en 2012 et en 2013. La température est en augmentation (27°C), de même que la turbidité (31,2 mg/l), le sodium (238,38 mg/l) et le calcium (109,2 mg/l) dans le bassin du fleuve Ouémé à Bétérou comparativement à la concentration maximale admise au Bénin qui est respectivement de 25°C, de 5 mg/l et 100 mg/l (Akognongbé, 2014). Or, la température joue un rôle primordial dans la distribution des espèces, aussi bien par ses niveaux extrêmes que par ses variations diurnes ou saisonnières et donc influe sur la distribution des espèces dans chaque partie du bassin. Les fortes turbidités constituent aussi des risques de maladies gastro-intestinales, car les micro-organismes se fixent aux particules en suspension dans l'eau turbide, ce qui empêche l'eau d'être correctement désinfectée. Or, elle sert de boisson pour certaines populations riveraines surtout en amont.

La couleur de l'eau quant à elle est aussi en augmentation, de 697,5 unité de couleur vraie en saison sèche (Hounsou *et al.*, 2011) et 598 unité de couleur vraie en saison pluvieuse (Akognongbé, 2014) contre une norme admise de 15 unité de couleur vraie au Bénin. Par contre, d'autres ont connu une diminution de leur concentration : du nitrate (5,2 mg/l), de sulfate (2,2 mg/l), du magnésium (3,1 mg/l) comparativement à la norme admise au Bénin qui est respectivement de 50 mg/l, 500 mg/l, 50 mg /l (Akognongbé, 2014). Ces variations des paramètres physico-chimiques ne sont pas sans conséquence sur le biotope et la biocénose. Par exemple l'augmentation du sodium dans l'eau est issue du sol du fait de l'utilisation des intrants agricoles pour la production du coton dans le bassin versant. Ces paramètres modifient la qualité de l'eau et par conséquent entraînent parfois la migration ou la disparition des espèces. La forte turbidité (129 unités néphélobétriques) et l'excès de nitrate entraînent la prolifération des végétaux aquatiques qui en se décomposant utilisent le

dioxygène de l'eau ce qui provoque la mort des espèces aquatiques : c'est le phénomène d'eutrophisation (Biernaux, 1978 ; Hounsou *et al.*, 2011). A cet effet, il est nécessaire de définir les périodes propices de l'exploitation des écosystèmes et en particulier des écosystèmes aquatiques.

La figure 9 illustre le débit écologique dans l'hydrosystème Ouémé. Appelé encore '*débit réservé*' des cours d'eau, il permet de laisser en aval d'un prélèvement dans un cours d'eau, un débit suffisant pour permettre une vie biologique satisfaisante est fondamental. Car, il permet de garantir l'équilibre entre les usages de la ressource en eau et la protection des écosystèmes aquatiques. Ainsi, de la figure 9, il ressort de l'analyse que dans le bassin à Bétérou, c'est seulement au cours des mois de juillet à novembre (5 mois) que le débit écologique est supérieur au débit moyen mensuel. De façon pratique, l'abondance de l'écoulement s'observe surtout de juillet à octobre. Par contre, en aval du bassin à Bonou, l'exploitation intense peut se faire sur six mois (juin à novembre), toutefois avec une humidité des sols de décembre à janvier. Le rude étiage s'observe seulement au cours des mois de février –mars à Bonou et de décembre à mai à Bétérou. En dehors de ces périodes humides, tout usage des eaux doit être interdit à l'exception du mois de novembre à Bétérou et de juin à Bonou où il doit être contrôlé pour une préservation de la diversité biologique du bassin.

**Figure 9** : Débit écologique dans le bassin du fleuve Ouémé à Bétérou et à Bonou de 1960 à 2011

Au cours des mois de décembre à mai voire juin, une adaptation des populations riveraines des prélèvements est nécessaire, afin de pouvoir faire face aux périodes d'étiage de l'hydrosystème Ouémé en amont comme en aval. Ceci nécessite une diminution du prélèvement et l'abandon certaines activités demandeur d'eau. Pour les collectivités dont

l'alimentation en eau potable dépend seulement du prélèvement dans le fleuve, cela implique de disposer d'une ressource alternative comme les ressources en eau souterraines. Car le passage progressif au dixième du module est un des moyens de la reconquête de la qualité des milieux aquatiques pour une durabilité du biotope et de la biocénose (Bruno *et al.*, 2003 ; Heegaard *et al.*, 2006) .

En outre, les piscicultures, comme les autres activités économiques développées dans le cours d'eau, doivent également respecter ce principe à travers soit le recours à des ressources alternatives ou au recyclage de l'eau dans chaque sous bassin versant ou dans chaque espace homogène de l'hydrosystème.

### **3.3. Caractérisation des hydroécorégions de l'hydrosystème Ouémé**

La caractérisation du bassin du point de vue homogène est induit par les déterminants physiques qui contrôlent l'organisation et le fonctionnement global des écosystèmes aquatiques (Chandesris *et al.*, 2005). De la définition de Wasson *et al.* (2002 et 2004), la diversité naturelle de l'hydrosystème Ouémé résulte de deux facteurs : le gradient amont-aval et l'hétérogénéité des régions.

Les figures 10a et b présentent les facteurs déterminants de la répartition de l'eau dans le bassin. Les plus fortes pentes et altitudes s'observent en amont et les plus faibles en aval d'où le gradient amont-aval. C'est ce qui justifie la descente des eaux du bassin vers la basse vallée et qui inonde de façon récurrente le Delta de l'Ouémé et le lac Nokoué pendant les mois de septembre à octobre, où, le bassin enregistre en plus les précipitations de la petite saison pluvieuse du domaine subéquatorial. Ces deux facteurs sont déterminants dans la distribution des ressources en eau et répartition des formations écologiques. Ainsi, les savanes saxicoles sont rencontrées dans la partie amont du bassin et précisément autour de Bétérou (figure 11). Par contre, les plantations de palmier à huile et les prairies à *Raphia* sont

enregistrées dans la basse vallée au tour de Bonou (figure 11), du fait de leur besoin en quantité en eau.

**Figure 10:** Carte de pente et d'altitude du secteur d'étude

Les galeries forestières sont plus denses dans la partie aval du bassin où l'humidité du sol règne en quasi-permanente. En amont du bassin, c'est la forêt claire, les savanes arbustives et saxicoles qui sont les plus dominantes.

**Figure 11 :** Ecologie de l'hydrosystème Ouémé

La superposition des cartes agroécologique et géologique a permis de déterminer les hydroécorégions dans l'hydrosystème Ouémé (figure 12). Ceci confirme cette répartition des formations végétations en fonction des paramètres biophysiques. Ainsi, les formations denses sont plus concentrées dans le bassin sédimentaire que sur le socle cristallin qui occupe les trois quart (3/4) du bassin. Il est à noter deux grands hydroécorégions : le socle cristallin (HER1) et le bassin sédimentaire (HER2). Le HER1 est subdivisé en plusieurs sous espace homogène en fonction de la diversité biologique. Ainsi, on dénombre les hydroécorégions des forêts claires, semi-décidues et décidues, des savanes arborées et saxicoles. Par contre dans le HER2, les sous espaces homogènes sont celles des forêts marécageuses de *Raphia gigantea*, de galeries forestières, de plantations de palmier à huile, de teck, les mosaïques de culture et jachères à dominance d'espèces forestières, les savanes arborées.

**Figure 12 :** Structuration des hydro-écorégions du bassin du fleuve Ouémé

#### **4. Conclusion**

Il ressort de cette étude une diminution de 16 % des lames d'eau précipitées dans le bassin sur la période sèche (1969-2011) par rapport à la période humide (1960-1968). Cette baisse des précipitations ajoutée à la forte évaporation a amplifié de trois fois en moyenne le déficit hydrologique. Cette inégalement répartition des précipitations dans le bassin conditionne la dynamique hydro-écologique et donc la répartition des espèces végétales et animales, terrestres et aquatiques. La variation hydroclimatique dans l'hydrosystème Ouémé induit une variation des paramètres physico-chimiques qui impactent la vie du biotope et de la biocénose. L'augmentation de ces paramètres dans le sol et dans l'eau confirme le degré de dégradation de la biodiversité dans l'hydrosystème Ouémé, mais qui est inégalement répartie. L'eutrophisation de la basse vallée de l'Ouémé se justifie surtout par le gradient amont-aval qui facilite le drainage des polluants issus de l'utilisation des intrants agricoles pour la production cotonnière dans le bassin. De même, les flux terrigènes drainés par les eaux contribuent à l'ensablement de la basse vallée. D'où l'exploitation non contrôlée des sables dans certaines parties du bassin par les riverains pour la commercialisation.

La confrontation des cartes agroécologique et géologique de l'hydrosystème a permis de structurer le bassin de l'Ouémé en deux grandes hydroécorégions : le socle cristallin (HER1) caractérisé par un régime tropical et le bassin sédimentaire (HER2) par un régime subéquatorial. Chaque hydroécorégion est subdivisée en plusieurs sous-espaces homogènes du point de vue écologique. Ainsi, les espèces de savanes sont plus dominantes dans le HER1 alors que les forêts denses, les plantations de teck et de palmier à huile gouvernent le HER2. L'abondance d'eau dans le HER2 justifie la dominance des espèces de mangrove, de prairie, de fourré contrairement à HER1 gouvernée par la forêt claire et savanes boisées et saxicoles.

**Remerciements :** Les remerciements vont à l'Agence Universitaire Francophone (AUF) à travers le projet « Variabilité climatique et dynamique des fonctions / services des hydro-écorégions du bassin de l'Ouémé au Bénin (Afrique de l'Ouest) » dans le cadre du projet AUF :« Stimulation et valorisation de la recherche », aux membres du Laboratoire Pierre Pagney : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE) de l'Université d'Abomey-Calavi et aux élus locaux du bassin versant du fleuve Ouémé notamment ceux de la basse vallée.

## 5. Références

Abdoulaye D., 2015. *Dynamique de l'occupation des terres et ses incidences sur l'écoulement dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou (Nord- Bénin)*. Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 253 p.

Ahouansou M., 2008. *Modélisation du fonctionnement hydrologique dans le bassin versant de l'Ouémé à Savè : contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau*. Dissertation, Université de Abomey-Calavi.

Akognongbé S. J.A., 2014. *Influence de la variabilité climatique et des activités anthropiques sur les eaux de surface dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou au Bénin*. Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 258 p.

Amoussou E., 2010. *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvial lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de Doctorat Unique, Université de Bourgogne, France, 313 p.

Amoussou E., Camberlin P. et Mahé G., (2012) : Impact de la variabilité climatique et du barrage de Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo au Bénin. In « *Hydrological Sciences Journal* », Vol.57, Issue 4, pp 805-817.

Anthelme F., Waziri Mato M., De Boissieu D. et Giazzi F., 2006. « Dégradation des ressources végétales au contact des activités humaines et perspectives de conservation dans le massif de l'Air (Sahara, Niger) », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 7 Numéro 2 | septembre 2006, mis en ligne le 08 septembre 2006, consulté le 24 septembre 2015. URL : <http://vertigo.revues.org/2224> ; DOI : 10.4000/vertigo.2224.

Ar Gall E. et Le Duff M., 2007. *UBO, Ifremer, Contrôle de surveillance DCE 2007. Suivi de la flore benthique Masses d'eau côtières, Radiale macroalgues intertidales de Malban, Molène, Caro/Karo, Saint-Goustan 15/12/2007.*

Ardoin-Bardin S., 2004. *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne.* Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 437 p.

Biernaux J., 1978. Eutrophisation et hypereutrophisation des eaux de surface, *Annales de Gembloux*. Belgique 1979, 85, 55-64.

Boko M., 1987. Etude sur la variabilité pluviométrique au Bénin. *Centre de Recherche de Climatologie*, URA 909 du CNRS, Dijon., pp 41-50.

Boko M., 1988. *Climats et communautés rurales du Bénin : Rythmes climatiques et rythmes de développement.* Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres et Sciences Humaines. Université de Bourgogne, Dijon. 2 volumes, 608 p.

Bruno J.F., Stachowicz J.J. et Bertness, M.D., 2003. Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends in Ecology and Evolution* 18 : 119-125.  
DOI : [10.1016/S0169-5347\(02\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)00045-9)

Chandesris A., Wasson J.G. et Pella H., 2005. *Hydro-écorégions de la Martinique : Propositions de régionalisation des écosystèmes aquatiques en vue de l'application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau.* Rapport d'étude, CEMAGREF, 19 p.

Child, G., 2003. Setting and achieving objectives for conserving biological diversity in arid environments. *Journal of Arid Environments* 54, pp 47-54.

Fontaine B. et Janicot S., 1993. L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, 8 (1), pp 28-53.

Frédéric J., 2015. « Maîtrise de l'eau et développement durable en Afrique de l'ouest : de la nécessité d'une coopération régionale autour des systèmes hydrologiques transfrontaliers », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 7 Numéro 2 | septembre 2006, mis en ligne le 28 avril 2006, consulté le 24 septembre 2015. URL : <http://vertigo.revues.org/2402> ; DOI : 10.4000/vertigo.2402

GIEC, 2007. *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*. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.

Heegaard E., Lotter A. F. & Birks H.J.B., 2006. Aquatic biota and the detection of climate change : are there consistent aquatic ecotones ? *Journal of Paleolimnology*, 35, pp 507-18.

Houndénou C., 1999. *Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide. L'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation*. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 390 p.

Hounsou M. B., Ahamidé B., Agbossou K. E. et Gaiser Th., 2011. Evaluation of water quality in the Ouémé River (Bénin). In « *The Environmentalist* », Volume 31, Issue 4, pp 407-415.

Hubert P., Carbonnel J.P., Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits d'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349–367.

Hufty A., 1976. *Introduction à la climatologie*. P.U.F. Collection Magellan, Paris. 264 p.

Kamagaté B., 2006. *Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (Haute vallée de l'Ouémé)*. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, Montpellier (France), 320 p.

Kodja D. J., 2013. *Etudes des risques hydroclimatiques dans la vallée de l'Ouémé à Bonou*. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA), Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 108 p.

Lachenbruch P. A., Mickey P., 1968. On Expected Probabilities of Misclassification in Discriminant Analysis, Necessary Sample Size, and a Relation with the Multiple Correlation Coefficient, *Biometrics* Vol. 24, No. 4 (Dec., 1968), pp. 823-834

Lawin A. E., 2007. *Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la Haute vallée de l'Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA – CATCH Bénin*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 231 p.

Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y. et Gualde R., 1993. *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*. Edition ORSTOM; 540 p.

Le Lay M., 2006. *Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin*. Thèse de l'INPG, Grenoble, 251 p.

Le Lay, M., 2002. *Caractérisation hydrologique et simulation numérique des écoulements sur le bassin de la Haute vallée de l'Ouémé*. Rapport de DEA MMGE, Grenoble, 40 p.

Lubès H., Masson J-M., Raous P., Tapiayu M., 1994. Logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielles adapté à l'évaluation du risque en hydrologie. *Manuel de calcul ORSTOM*, Paris, 140 p.

Mahé G. et Citeau J., 1993. Relation océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson Atlantique ; Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatique*, n° 94, pp 34-54.

Mahé G. et Olivry J.C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Rev. Sécheresse* n° 6, pp 109-117.

Mama D., 2010. *Méthodologie et résultats du diagnostic de l'eutrophisation du lac Nokoué (Bénin)*. Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, France, 157 p.

Oettli P., 2008. *Précipitations et relief en Afrique orientale et australe: Modélisations statistiques et géostatistiques*. Thèse de Doctorat à l'Université de Bourgogne, Centre de Recherches de Climatologie. France, 272 p + Annexes.

Ogouwalé E., 2006. *Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : indicateurs, scénarios et prospective de la sécurité alimentaire*. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 302 p.

Paturel J. E. et Servat E., 1996. Procédure d'identification de « rupture » dans les séries hydrologiques ; modification du régime pluviométrique en Afrique de l'ouest non sahéenne. In « *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement* ». IAHS Publ, n° 238, pp 99-110.

Paturel J.E., Servat E. et Delattre M.O., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahéenne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des Sciences Hydrologiques*; 43: 937- 46.

Peugeot Ch., Bock O., Boone A., Cappelaere B., Gosset M., Meynadier R., Séguis L., Lebel T. et Redelsperger J-L., 2012. Le cycle de l'eau dans le système de mousson d'Afrique de l'Ouest. In « *La Météorologie* », Spécial AMMA, pp55-63.

Philippon N., 2002. *Une nouvelle approche pour la prévision statistique des précipitations saisonnières en Afrique de l'Ouest et de l'Est : méthodes, diagnostics (1968-1998) et applications (2000-2001)*. Thèse de Doctorat Université de Bourgogne, CRC – CNRS UMR5080, 241 p + Annexes.

Roche P., 1998. *Dynamique de la biodiversité et action de l'homme*. Rapport ENV-SRAE–94233, Paris, France, 6 pp.

Séguis L., Thierry L., Peugeot C., Bock O., Boone A., Cappelaere B., Gosset M., Meynadier R., et Redelsperger J.L., 2011. Le cycle de l'eau dans le système de mousson d'Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, Spécial AMMA, pp 55-63

Servat E., Paturel J.E., Lubès-Niel H., Kouamé B., Masson J.M., Travaglio M., Marieu B., 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 12, n° 2, pp. 363-387.

Sutcliffe V.J., Piper B.S., 1985. Bilan hydrologique en Guinée et au Togo - Bénin. In *hydrol. Continent.*, vol I, n° 1, pp. 51 - 61.

Totin V. S. H., Zannou A., Amoussou E., Afouda A. et Boko M., 2014. Progressive aridity impact on the hydrological regime on the Volta River basin in Benin (West Africa). *Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions, Proceedings of FRIEND-Water 2014*, Montpellier, France, October 2014 (IAHS Publ. 363, 2014), 17-22.

Totin V.S.H., Amoussou E. et Boko M., 2007. Dynamique de la mousson ouest africaine, régime hydrologique et maîtrise de l'eau dans le Bassin Supérieur de l'Ouémé. *Climat et développement*, Vol. 4, pp 44-54.

Totin V.S.H., Clédjo P., Afouda A., Boko M., 2009. Variabilité pluviométrique et bilan climatique dans le bassin de la volta au Bénin. *Climat et Développement*, **8**, 81–94.

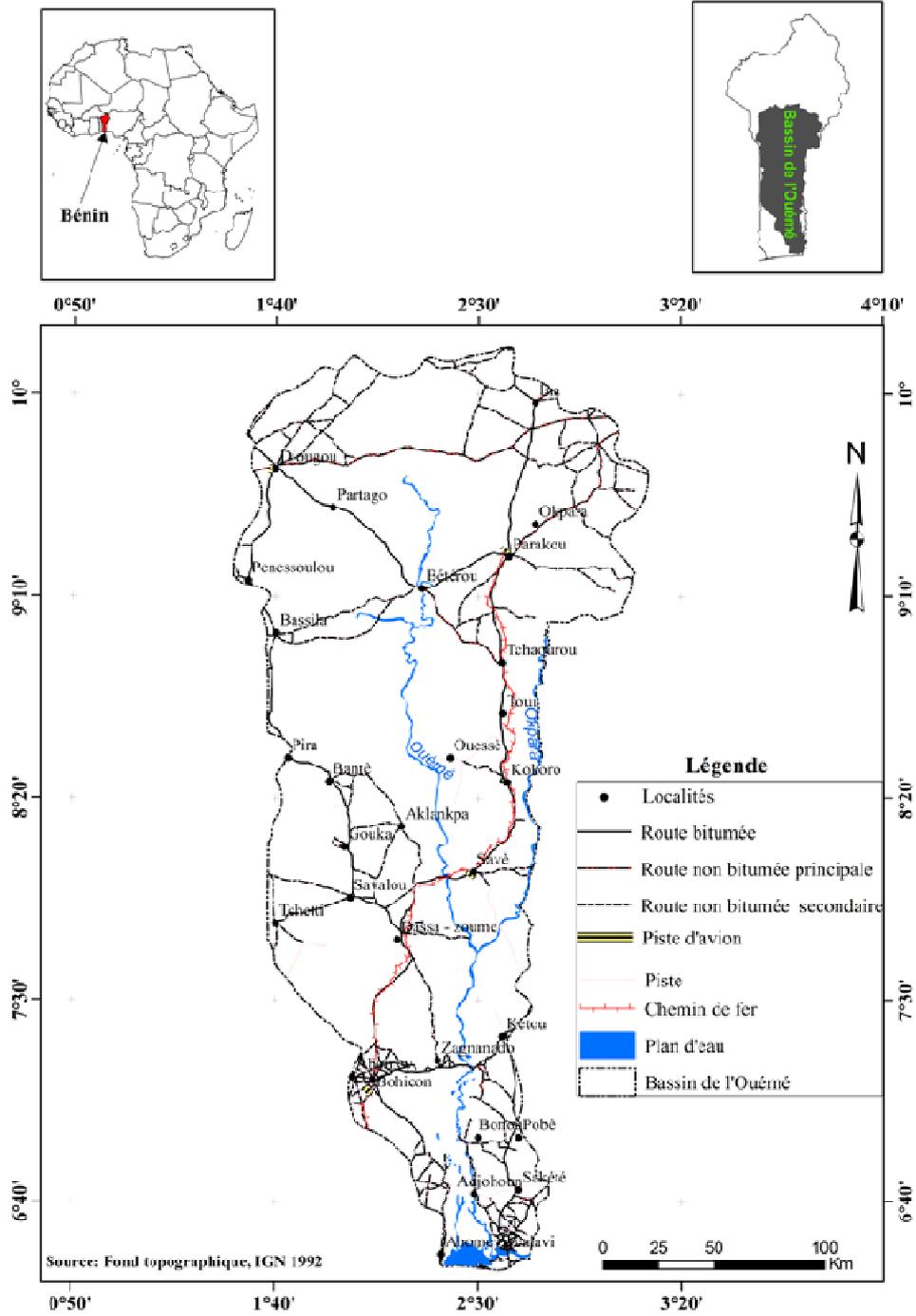
Vissin E.W., 2007. *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 280 p.

Vodounnon A. J., 2008. *Contribution à l'étude de la caractérisation hydropluviométrique du bassin de l'Ouémé avec le modèle GR2M*. Mémoire de maîtrise de géographique, DGAT/FLASH/ UAC, 83 p.

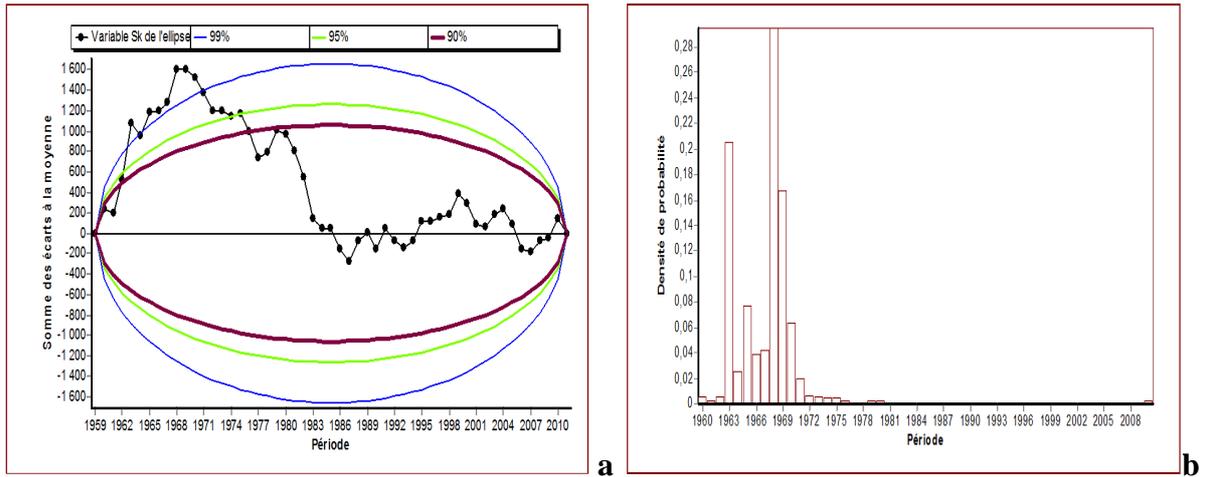
Wasson J.G., Chandesris A., Pella H. et Blanc L., 2002. *Définition des hydro-écorégions françaises métropolitaines*. Rapport final MEDD, juin 2002, 190 p.

Wasson J.G., Chandesris A., Pella H., 2004. *Hydro-écorégion de la Guadeloupe – Propositions de régionalisation des écosystèmes aquatiques*. Rapport MEDD, mai 2004, 17 p.

Zannou Y. B. A., 2011. *Analyse et modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin. Cas du bassin de l’Ouémé à Bétérou*. Thèse de Doctorat, Université d’Abomey-Calavi, CIPMA, Bénin, 315 p +annexes.

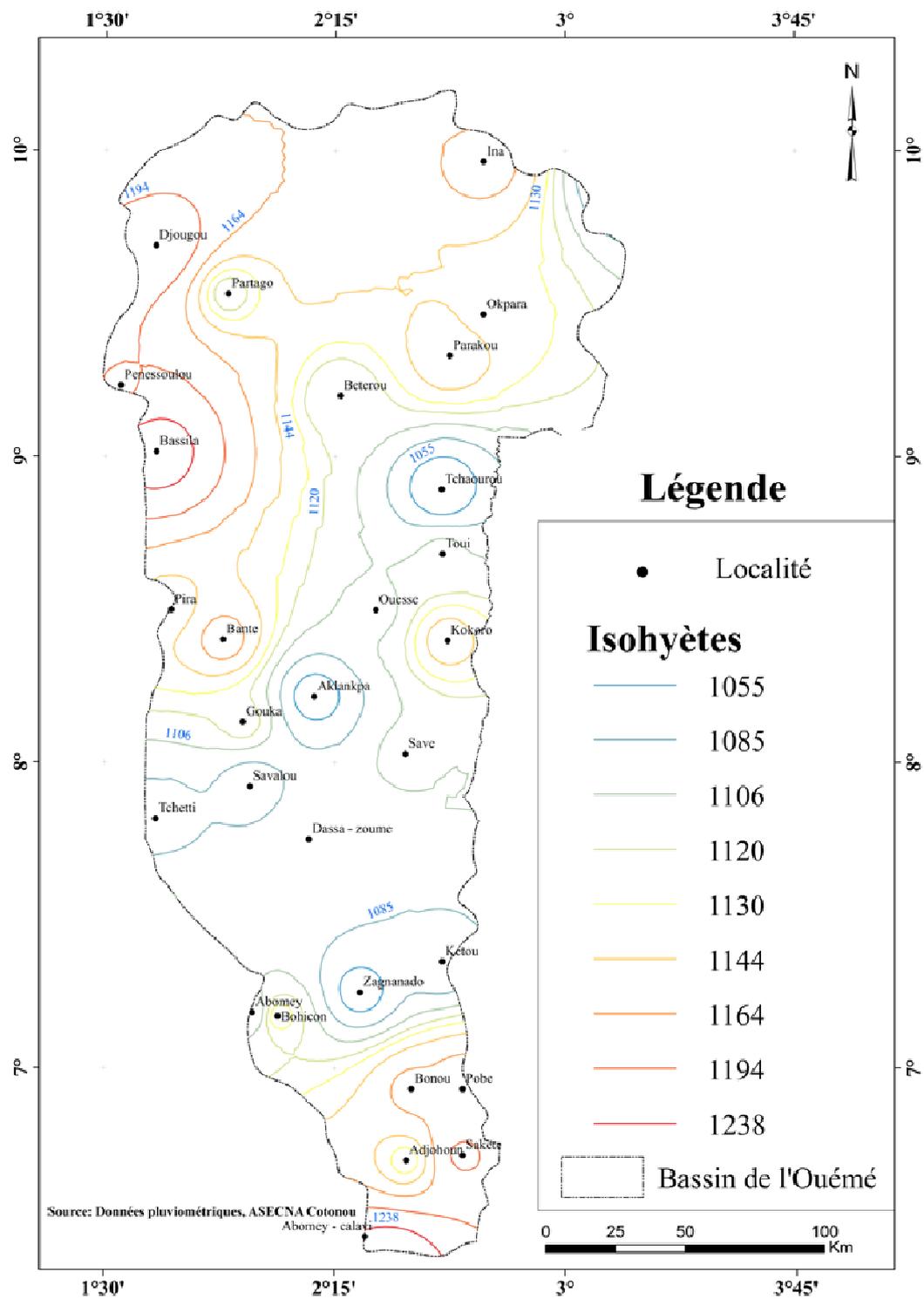


**Figure 1** : Localisation du secteur d'étude

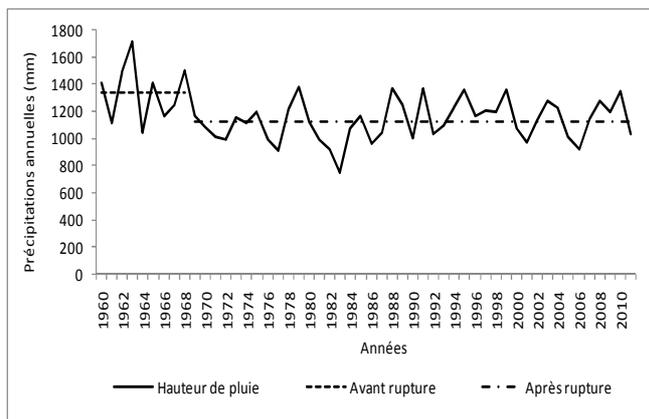


**Figure 2** : Rupture de stationnarité pluviométrique en 1968 dans le bassin de l’Ouémé Bonou de 1961 à 2011.

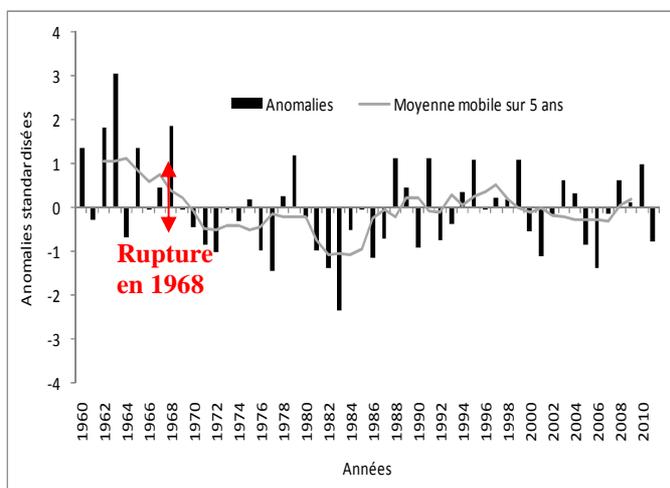
**NB :** a) Méthode de Ellipse de Bois (99 %) ; b) Méthode Bayésienne de Lee et Heghinian



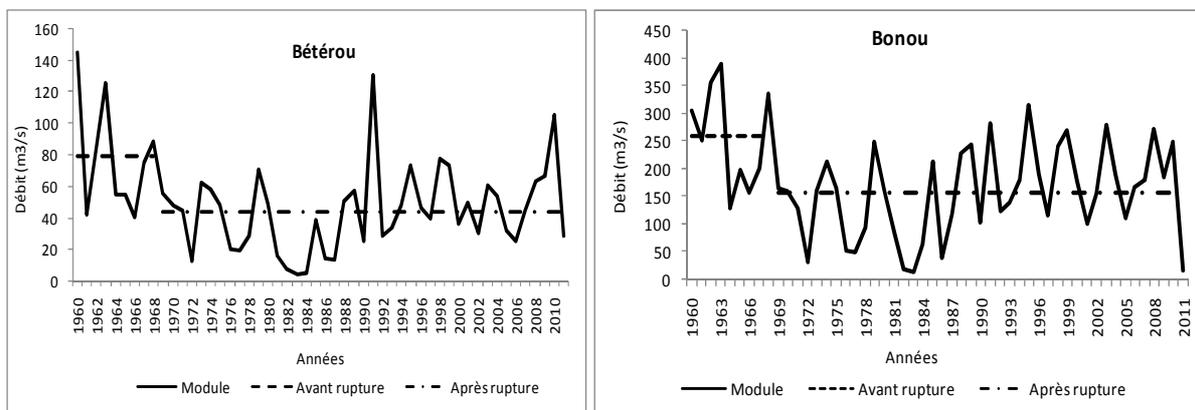
**Figure 3 :** Evolution spatiale des hauteurs de pluie annuelle dans le bassin du fleuve Ouémé de 1960 à 2011



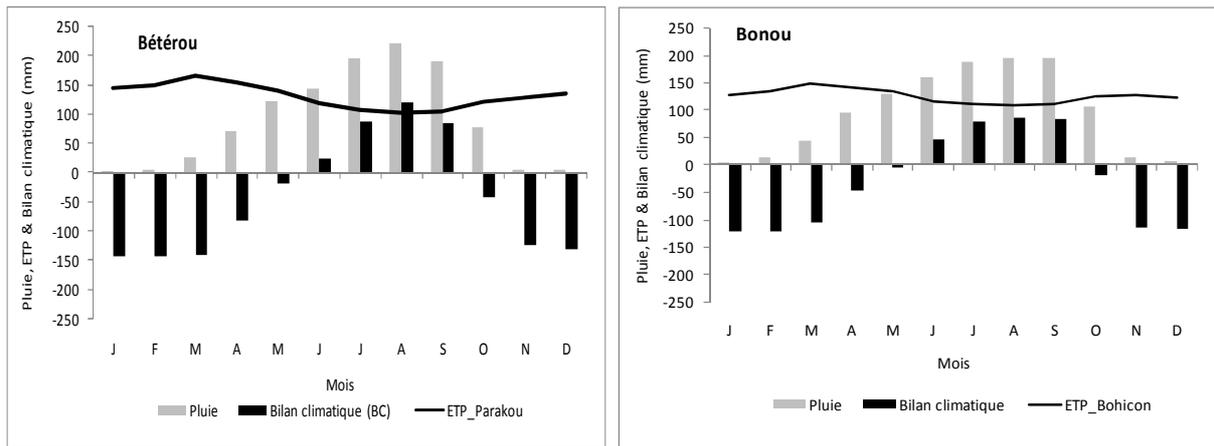
**Figure 4:** Evolution annuelle des précipitations dans le bassin du fleuve Ouémé à Bonou de 1960 à 2011



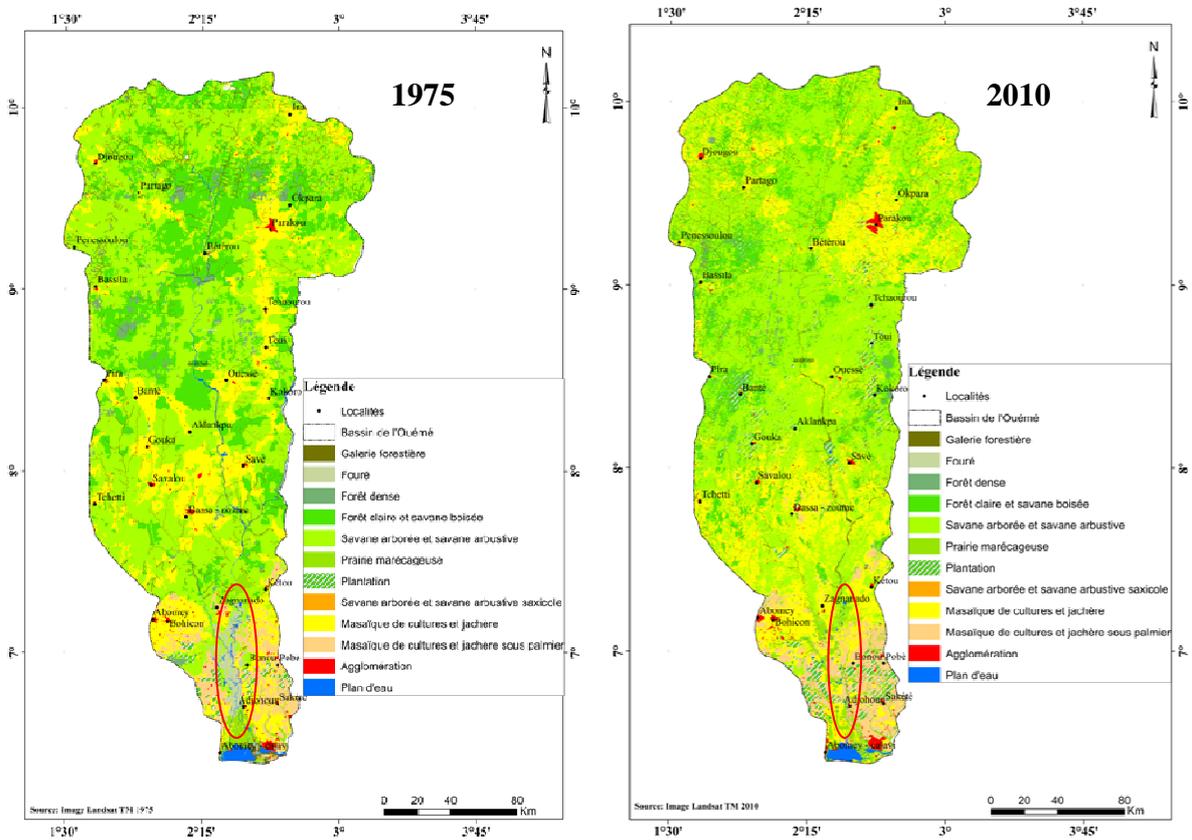
**Figure 5:** Variabilité interannuelle des précipitations dans le bassin du fleuve Ouémé à Bonou de 1960 à 2011



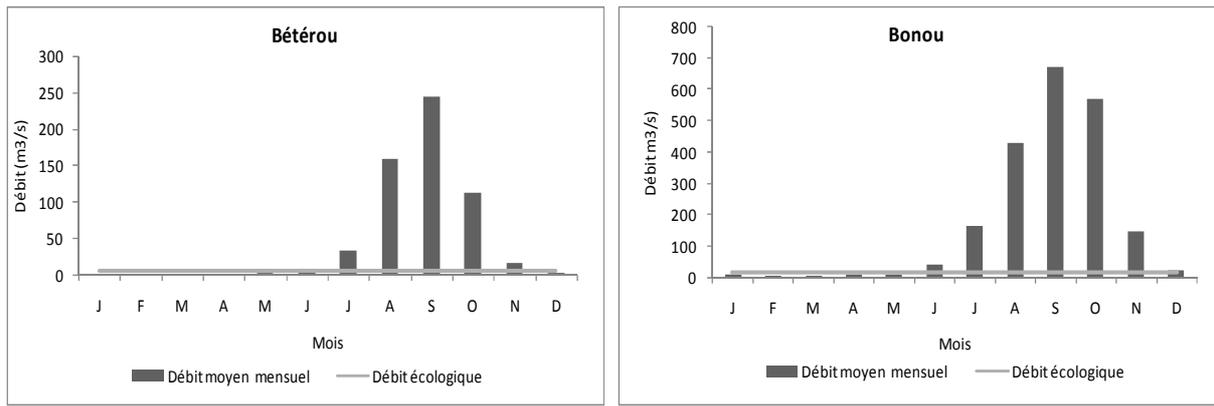
**Figure 6:** Evolution annuelle des débits moyens dans le bassin du fleuve Ouémé à Bétérou et à Bonou de 1960 à 2011



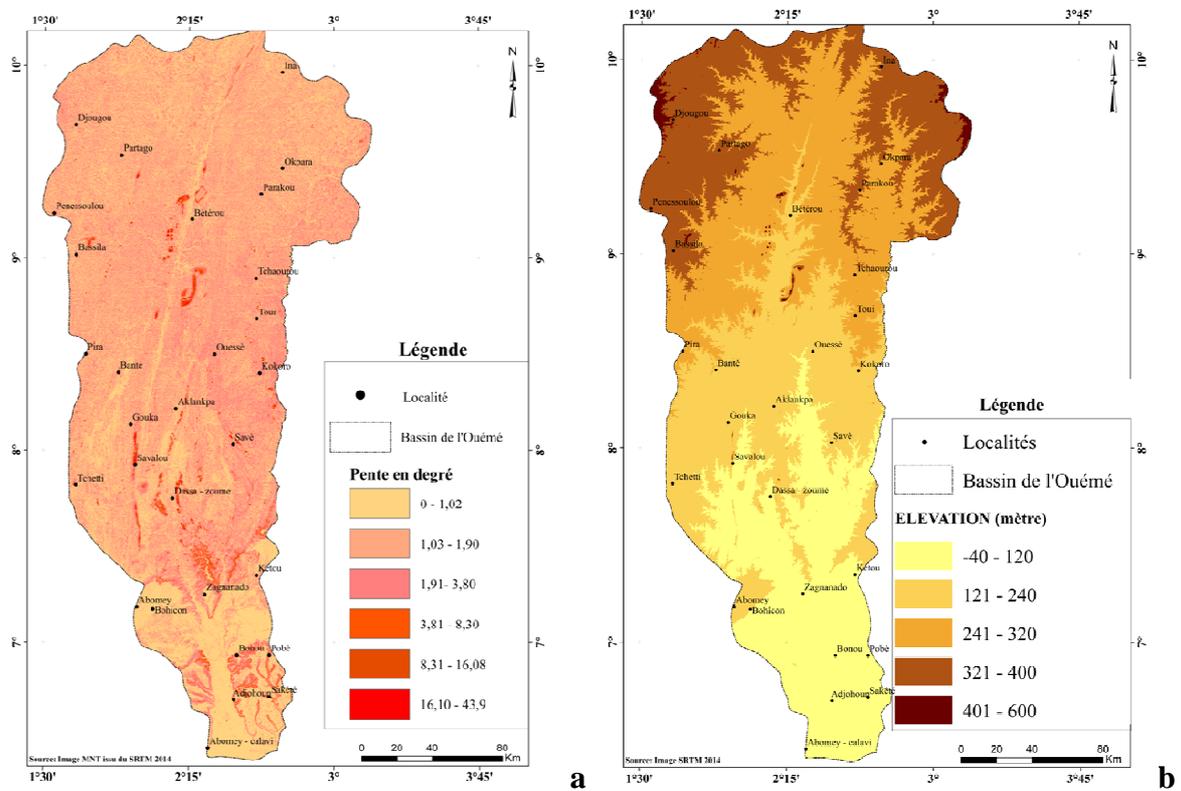
**Figure 7:** Bilan climatique dans le bassin du fleuve Ouémé à Bétérou et à Bonou de 1965 à 2011



**Figure 8 :** Etat de l'occupation des terres en 1975 et en 2010.



**Figure 9 :** Débit écologique dans le bassin du fleuve Ouémé à Bétérou et à Bonou de 1960 à 2011



**Figure 10:** Carte de pente et d'altitude du secteur d'étude

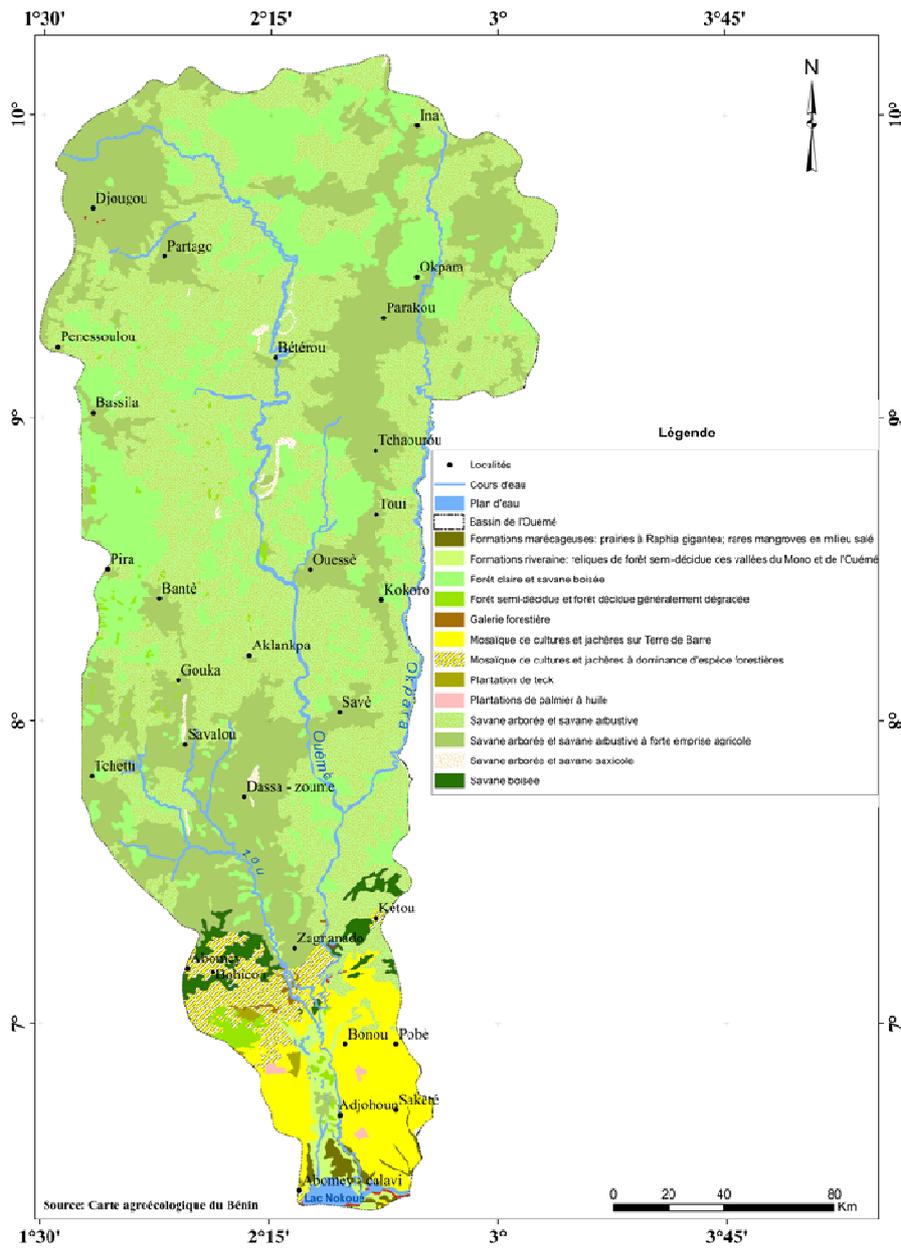


Figure 11 : Ecologie de l'hydrosystème Ouémé

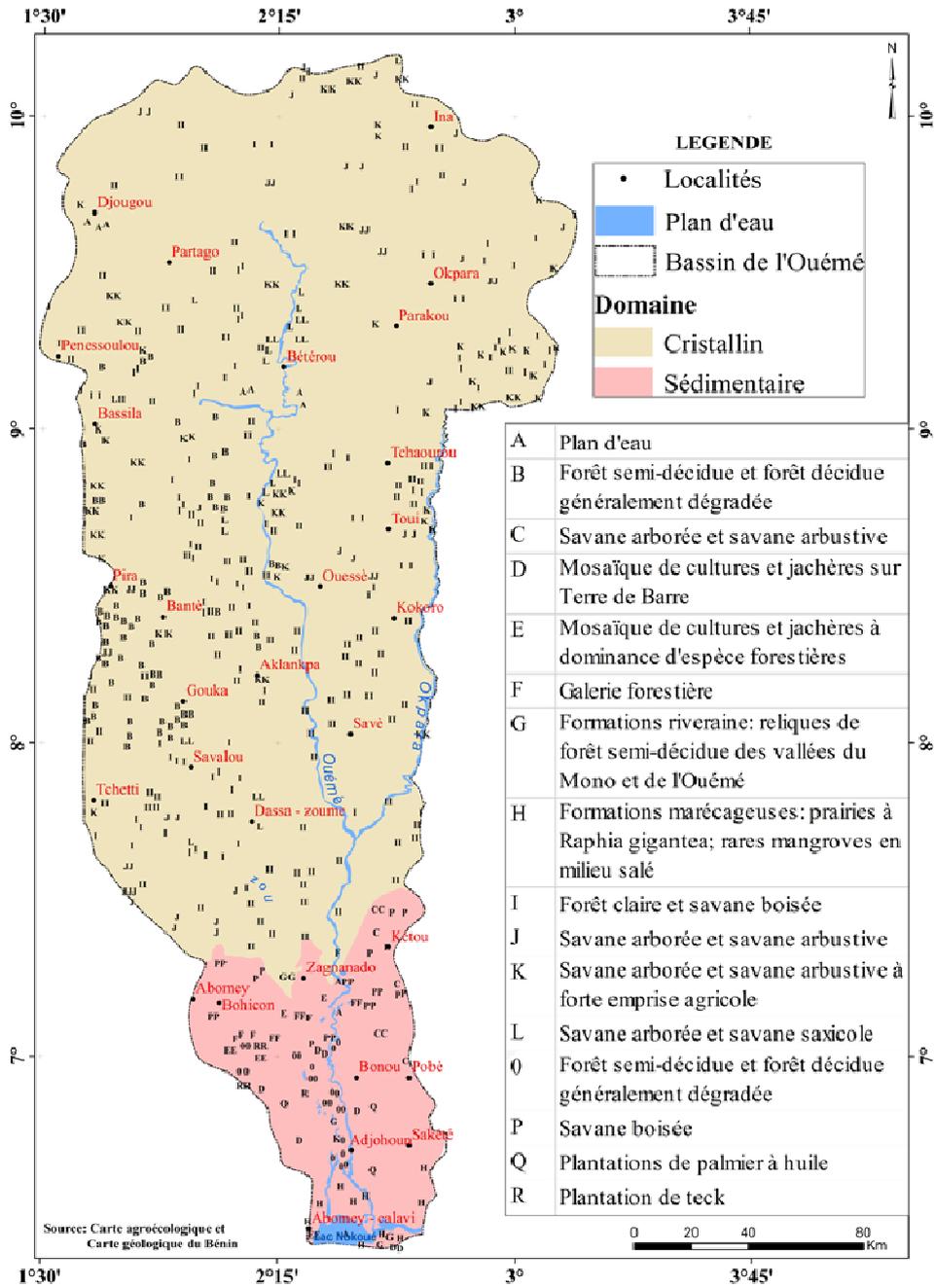


Figure 12 : Structuration des hydro-écorégions du bassin du fleuve Ouémé