

Caractérisation de la qualité physico-chimique des eaux de la rivière Alibori dans le bassin cotonnier du Bénin

Thierry Matinkpon AGBLONON HOUELOME^{1,3*}, Delphine ADANDEDJAN¹, Antoine CHIKOU¹, Ibrahim IMOROU TOKO², Issaka YOUSAO³ et Philippe LALEYE¹

¹ *Université d'Abomey-Calavi, Faculté des Sciences Agronomiques, Laboratoire d'Hydrobiologie et d'Aquaculture, 01 BP 526 Cotonou, Bénin*

² *Université de Parakou, Faculté d'Agronomie, Unité de Recherche en Aquaculture et Ecotoxicologie Aquatique, 03 BP 61 Parakou-URAEaq, Bénin*

³ *Université d'Abomey-Calavi, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Laboratoire de Biotechnologie Animale et de Technologie des Viandes*

* Correspondance, courriel : tagblonon@gmail.com

Résumé

L'objectif de l'étude est d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux de la rivière Alibori. Les mesures et les dosages ont été réalisés de juin 2015 à mai 2016. Les mesures des paramètres physico-chimiques ont été effectuées *in situ* et les nutriments dosés par la méthode chromatographique ICS 1000. Les données ont fait l'objet d'analyse statistique descriptive pour caractériser la variabilité spatiale et temporelle des paramètres étudiés. Elles ont été aussi soumises à une Analyse en Composantes Principales (ACP) pour mettre évidence le regroupement des stations sur la base des facteurs abiotiques. Les résultats montrent que les eaux sont caractérisées par de fortes concentrations en sels dissous et de faibles teneurs en oxygène dissous. Ils révèlent, en outre, que les stations situées en aval de la rivière sont les plus minéralisées notamment pendant la saison des pluies. L'ordination des stations en fonction des variables environnementales révèle un gradient amont-aval suivant les paramètres et a défini une zonation longitudinale de la rivière Alibori.

Mots-clés : *pollution, qualité physico-chimique, rivière Alibori.*

Abstract

Characterization of the physico-chemical quality of Alibori river in the cotton basin of Benin

The objective of the study is to assess the physico-chemical quality of the waters of the Alibori River. Measures and assays were carried out from June 2015 to May 2016. Measures of physico-chemical parameters were carried out *in situ* and the nutrients analysed by the ICS 1000 chromatographic method. The data are subject to descriptive statistical analysis for characterizing the spatial and temporal variability of the parameters studied. They were also subjected to a Principal Component Analysis (PCA) for the assembly of stations on the basis of abiotic factors. The results show that the waters are characterized by high concentrations of dissolved salts and low levels of dissolved oxygen. They also reveal that the stations located downstream of the river are the most mineralized, especially during the rainy season. The ordination of the stations with environmental variables shows an upstream-downstream gradient according to the parameters and defined a longitudinal zonation of the Alibori River.

Keywords : *pollution, physicochemical quality, Alibori river.*

1. Introduction

Les différentes espèces à la base de la production de ressources et de services écologiques d'un écosystème sont sous le contrôle des variables environnementales. Les conditions abiotiques liées aux paramètres chimiques, et hydro-morphologiques des cours d'eau influencent la structuration spatio-temporelle des organismes [1]. L'étude de la qualité physico-chimique des cours d'eau permet de caractériser les facteurs abiotiques qui dégradent la qualité du milieu et menacent la vie aquatique [2]. Cette dégradation de la qualité des écosystèmes aquatiques est surtout liée aux activités agricoles sur les bassins versants qui présentent de sérieuses répercussions écologiques pour les plans et cours d'eau [3]. La rivière Alibori se situant dans une zone d'intenses activités agricoles surtout cotonnières, se présente comme un réceptacle des écoulements d'eaux de surface en provenance de des zones cultivées. Elle est donc soumise à l'action des intrants agricoles, qui de par leurs effets peuvent se révéler comme une menace pour l'intégrité écologique de l'écosystème [4]. En effet, la diversité biologique des rivières est étroitement liée à la qualité de l'habitat. Les caractéristiques d'habitat constituent les principaux facteurs qui déterminent la distribution et la répartition de la faune [5]. Dans le suivi de la qualité des écosystèmes aquatiques, l'évaluation de l'habitat environnant offre donc un complément d'information utile [6, 7]. Ainsi, l'évaluation de la qualité physico-chimique de la rivière Alibori devient indispensable pour l'appréciation de sa santé écologique et son degré de perturbation. Ce travail a pour l'objectif d'analyser la variation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques des eaux de la rivière Alibori et d'évaluer le risque de pollution du cours d'eau.

2. Méthodologie

2-1. Milieu d'étude

La rivière Alibori est un écosystème situé en zone soudanienne entre 10°30' et 12° de latitude Nord et 1°32' et 3°50' de longitude Est (*Figure 1*). Elle naît à 410 m d'altitude environ, dans le massif granitique de Kita sur le flanc de la chaîne de l'Atacora dans la commune de Péhonco. D'un bassin versant couvrant une superficie de 13 740 km², la rivière Alibori est longue de 427 km. Dans son cours moyen, le lit de la rivière est coupé de nombreux rapides. La pente du lit de l'Alibori est dans l'ensemble faible, de 0,5 à 0,2 m / km. Le bassin de l'Alibori est bordé, à l'Ouest, par les reliefs correspondant aux roches les plus basiques du groupe de Kandi; à l'Est, par les collines quartzitiques du groupe de Gbadagba dans la région de Bembèrèkè, puis par les reliefs formés sur les roches du groupe de Kandi. L'Alibori reçoit sur sa rive droite le Souédarou, le Sarédarou et le Darou-Woka; sur sa rive gauche, le Morokou, la Kparé, le Kénou, le Konékoga et le Kpako avant de se jeter dans le Niger en amont de Malanville [8, 9]. Elle s'étend dans le département d'Alibori avec beaucoup d'affluents éparpillés dans les communes de Kandi, Gogounou, Banikora, Ségbana, Karimama et Malanville.

2-2. Stations d'échantillonnages

Quinze stations ont été choisies le long d'un gradient longitudinal de la rivière (*Figure 1*). Toutes ont été échantillonnées mensuellement, soit 12 campagnes d'échantillonnages pendant la durée de l'étude (de juin 2015 à Mai 2016). Le Global Positioning System (GPS) a été utilisé pour la prise des coordonnées géographiques de chaque station. Les stations ont été choisies selon des critères bien définis que sont :

- la situation des stations par aux champs ;
- l'accessibilité facile aux stations en toutes périodes ;
- le gradient de pollution.

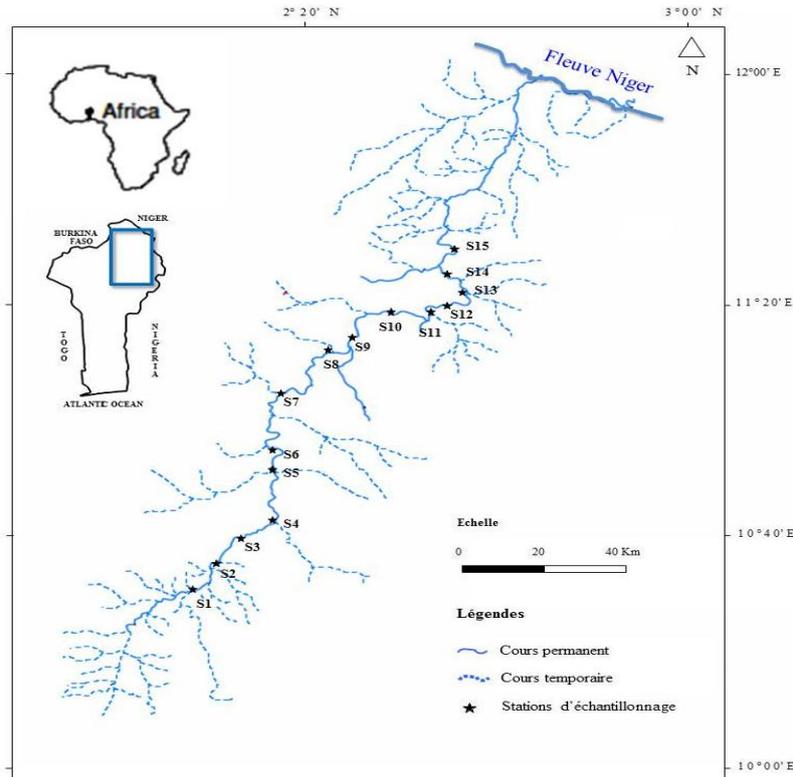


Figure 1 : Bassin de la rivière Alibori montrant les stations d'échantillonnage

2-3. Collecte des données

2-3-1. Mesure des variables physico-chimiques

Un disque de Secchi muni d'une corde graduée a été utilisé pour mesurer la transparence de l'eau et la profondeur au niveau des stations. Les mesures de pH, de la conductivité, de l'oxygène dissout et du TDS ont été réalisées avec des appareils de mesures physico-chimiques de marque HANNA. Ces appareils de mesure préalablement calibrés ont été mis en marche quelques minutes avant toute manipulation. Leurs sondes sont ensuite plongées dans l'eau et la sélection de la fonction adéquate a permis d'afficher à l'écran la valeur du paramètre concerné. Les mesures ont été effectuées entre 7 h et 9 h. La vitesse en surface (V_s) de l'eau a été mesurée en utilisant un flotteur. Un chronomètre a été utilisé pour évaluer le temps que met le flotteur pour parcourir une distance de 1 m mesurée au décimètre. Pour réduire le biais de la mesure de la vitesse de surface, cet exercice est répété trois fois. La vitesse est alors égale à la distance parcourue (1 m) rapportée au temps moyen (en secondes). La vitesse du courant V_c sera tirée selon la relation : $V_c = 0,80 \times V_s$. Elle est exprimée en cm / s.

2-3-2. Prélèvement de l'eau et dosage des sels dissous

Des prélèvements d'eau ont été effectués au niveau de chaque station en bouteilles en plastique de 500 ml et conservés dans une glacière contenant de glace pour leur acheminement au laboratoire. Au laboratoire, les prélèvements ont été conservés au frais à une température de 4° C. Les prélèvements d'eau ont fait l'objet de dosage des nutriments : les nitrites, les nitrates, le phosphore total et l'azote total. Les dosages ont été effectués par la méthode chromatographique ICS 1000 [10].

2-3-3. Échantillonnages des sédiments

Des échantillons de sédiment au fond de l'eau ont été prélevés pendant les campagnes d'échantillonnage. Ces échantillonnages ont été réalisés avec la benne de type Eckman. Les sédiments collectés ont été conservés dans des sachets et convoyés au laboratoire pour des analyses granulométriques [11]. Ces analyses ont servi à caractériser les habitats des organismes benthiques [12].

2-3-4. Traitement et analyses statistiques des données

Le test de normalité de Ryan Joiner a été utilisé pour tester la distribution des valeurs des paramètres physico-chimiques. A l'issue de ce test, celui de Kruskal-Wallis a été employé pour tester l'hétérogénéité des valeurs médianes des paramètres entre les stations et les mois. Le test de Mann-Whitney a été appliqué pour situer les différences entre les stations et les mois. Les variations spatiales et mensuelles des variables environnementales ont été présentées sous forme de boîtes à moustaches. L'interface utilisée pour la réalisation des boîtes à moustaches est développée par [13] et téléchargeable à partir du site www.inp-toulouse.fr. L'analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée à partir du fichier des variables descriptives représentant des mesures des paramètres physico-chimiques de la rivière Alibori. L'intérêt de la réalisation de cette analyse multivariée réside dans la production du cercle de corrélation permettant d'apprécier d'une part les corrélations entre les variables physico-chimiques et d'autre part les corrélations entre les variables physico-chimiques et les stations d'échantillonnage dans une dimension réduite. L'analyse a été réalisée avec le logiciel STATISTICA version 7.1.

3. Résultats

3-1. Variations spatiales des paramètres physico-chimiques

Les variations spatiales des paramètres physico-chimiques sont présentées à la **Figure 2**. Le **Tableau 1** illustre les résultats du test de comparaison de Kruskal-Wallis sur les variables environnementales. La variabilité de la température d'une station à une autre n'a pas été significative (Test de Kruskal-Wallis, $p > 0,05$). Son évolution spatiale a suivi pratiquement le même profil de l'amont à l'aval. Les valeurs maximales et minimales de la température de l'eau mesurées ont été respectivement de 32 °C (Alibori, Alibori K et Alibori B) et de 26 °C (Lougou) sur la rivière Alibori. Les mesures de la profondeur présentent des valeurs, qui varient de 1,5 m aux stations de Lougou, de Diadia1, de Diadia2 et d'Alibori, à 15,8 m à la station Alibori B en aval de la rivière. Dans l'ensemble, les stations les plus profondes ont été observées à l'aval de la rivière. Elle a connu une différence très significative d'une station à une autre au cours de l'étude (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). Les différences les plus significatives sont obtenues entre la station Ganroukoro d'une part, et les stations Alibori, Alibori K et Batran 2 d'autre part. La station Biowerekourou diffère aussi des stations Alibori B, Alibori K et Angaradebou (Test de Mann-Whitney, $p < 0,01$). La plus forte valeur de la transparence a été de 30 cm et observée à la station Biowerekourou en amont de la rivière. La faible valeur de la transparence (5 cm) a été enregistrée au niveau de quatre stations. Il s'agit des stations Biowerekourou, Bourin, Alibori B et Angaradebou situées en aval de la rivière. Dans l'ensemble, l'aval de la rivière abrite les stations les plus troubles. D'une station à une autre, la transparence a varié de façon très significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). Les stations Yanningourou, Ganroukoro, Dawong, Kpeborogou, Alibori B diffèrent notamment de la station Biowerekourou (Test de Mann-Whitney, $p < 0,001$). La même tendance d'évolution s'observe dans la variation spatiale de la conductivité et du TDS. La plus faible valeur de la conductivité de 64 $\mu\text{S} / \text{cm}$ a été mesurée aux stations d'Alibori K, d'Alibori B, de Batran 1 et de Batran 2. La plus forte valeur de la conductivité (446 $\mu\text{S} / \text{cm}$) a été, par contre, enregistrée à la station d'Alibori. La variation spatiale de la conductivité a été très significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$), notamment entre la station Diadia2 d'une

part, et les stations Bourin, Biowerekourou, Alibori et Alibori K d'autre part (Test de Mann-Whitney, $p < 0,001$). Pour les Solides Totaux Dissous (TDS), la valeur maximale (486 mg / L) a été mesurée en aval à la station de Batran 2. La valeur minimale (38,78 mg / L) a été obtenue à une station de l'amont (Yanningourou). La variation de la concentration en Solides Totaux Dissous a été très significative ($p < 0,0001$). Les différences sont marquées entre Yanningourou, Lougou et Ganroukoro d'une part, et l'Alibori d'autre part (Test de Mann-Whitney, $p < 0,001$). Quant au pH de l'eau de la rivière, il a fluctué de 6,1 (Biowerekouro et Alibori K), à 9 à la station d'Angaradebou. Le pH a connu une fluctuation spatiale très significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). La station de Yanningourou diffère de celles d'Alibori, Alibori B et de Alibori K. La station d'Angaradebou diffère de Lougou et de Diadia2 (Test de Mann-Whitney, $p < 0,05$). Les mesures de la teneur en oxygène dissous présentent des valeurs qui oscillent entre 1,03 mg / L et 8,5 mg / L. La plus faible valeur a été notée à la station d'Alibori et la plus forte à la station de Ganroukoro. Globalement, la teneur en oxygène dissous est forte dans la zone amont de la rivière et reste très faible dans les stations situées en aval. L'oxygène dissous a varié significativement d'une station à une autre (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). Cette différence est surtout marquée entre Ganroukoro d'une part, et Alibori B, Alibori K et Batran1 d'autre part. Elle a été aussi très significative entre les stations d'Alibori et de Batran 1 d'une part, et la station Yanningourou d'autre part (Test de Mann-Whitney, $p < 0,001$). La vitesse d'écoulement de l'eau de la rivière est très forte et reste supérieure à 86 cm / s dans toutes les stations. Les valeurs maximales et minimales de la vitesse du courant sont respectivement de 86 cm / s à la station d'Angaradebou et de 850 cm / s à la station de Ganroukoro. La variation a été significative d'une station à une autre (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). La différence a été surtout observée entre la station de Biowerekourou d'une part, et les stations de Ganroukoro, Diadia1 et Alibori B d'autre part (Test de Mann-Whitney, $p < 0,01$).

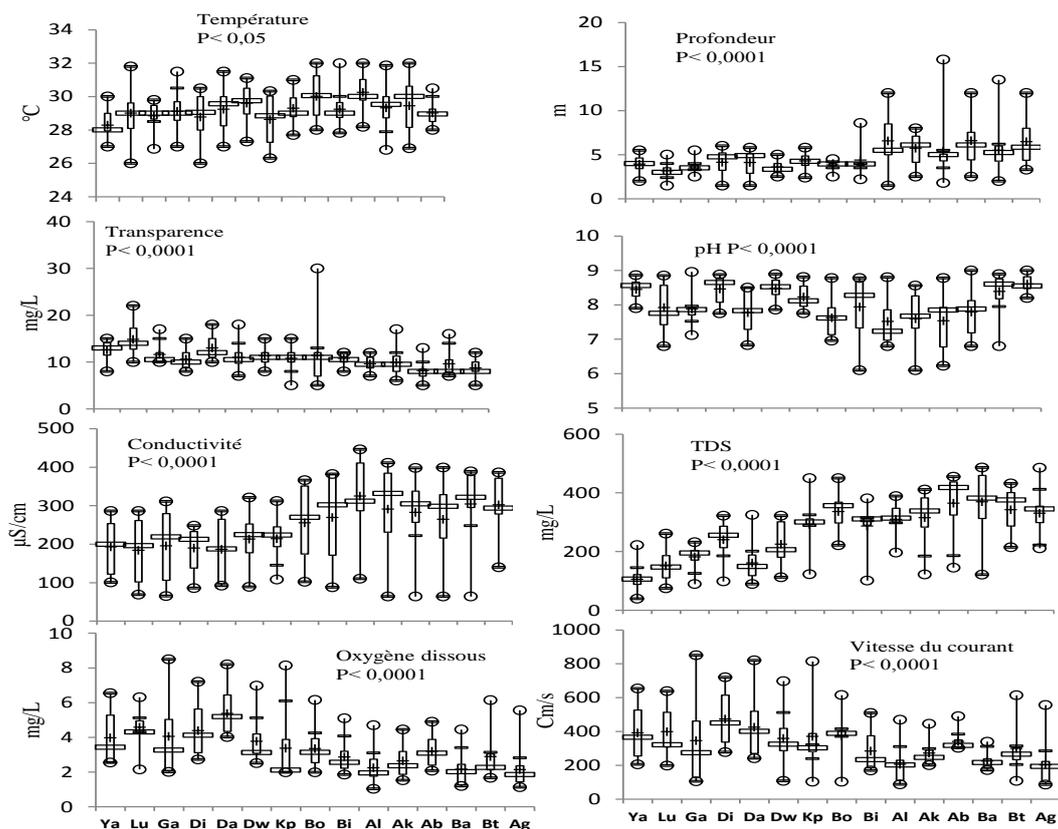


Figure 2 : Variations spatiales des paramètres physico-chimiques de la rivière Alibori.

Ya = Yanningourou, Lu = Lougou, Ga = Ganroukoro, Di = Diadia1, Da = Diadia2, Dw = Dawong, Kp = Kpeborougou, Bo = Bourin, Bi = Biowerekourou, Al = Alibori, AK = Alibori K, Ab, = Alibori B, Ba = Batran 1, Bt = Bantran 2, Ag = Angaradebou

3-2. Variations spatiales des teneurs en sels dissous

La **Figure 3** présente les variations spatiales des concentrations en nitrites, nitrates, en phosphates et Azote total. Les concentrations en ions nitrites varient significativement (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,01$). La faible et la forte valeur de la concentration de ces sels dissous sont respectivement de 0,006 mg / L et 3,9 mg / L. La valeur minimale a été mesurée à la station de Biowerekourou et la valeur maximale enregistrée à la station d'Alibori en aval. Les différences les plus significatives s'observent entre les stations Diadia2, Alibori k, Alibori B d'une part, et la station Lougou d'autre part (Test de Mann-Whitney, $p < 0,01$). De la même manière, la variation des teneurs en nitrates a connu une fluctuation très significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). Les ions nitrates ont présenté leur faible valeur (0,25 mg / L) aux stations de Batran 2 et d'Angaradebou et leur forte valeur (6,15 mg / L) à la station d'Alibori B. Les différences sont marquées entre la station Yanningourou et la station Batran 1 (Test de Mann-Whitney, $p < 0,01$). Les phosphates et l'azote total, contrairement aux autres sels dissous, n'ont pas connu une variation significative d'une station à l'autre (Test de Kruskal-Wallis, $p > 0,05$). L'azote total a présenté sa faible valeur (0,125 mg / L) aux stations de Lougou et d'Alibori et sa plus forte valeur (6,205) à la station de Batran1. La valeur minimale (0,145 mg / L) a été mesurée à la station de Lougou en amont et la valeur la plus forte (11,011 mg / L) est notée à la station de Batran1 en aval. Dans l'ensemble, les fortes concentrations des sels dissous ont été mesurées dans les stations d'aval. Les phosphates ont notamment suivi cette tendance avec des teneurs très prononcées dans le cours supérieur de la rivière. Quant aux autres ions, ils présentent la même tendance avec des valeurs moyennes qui ont augmenté d'amont en aval. Les stations en aval paraissent les plus minéralisées avec un risque de pollution élevée.

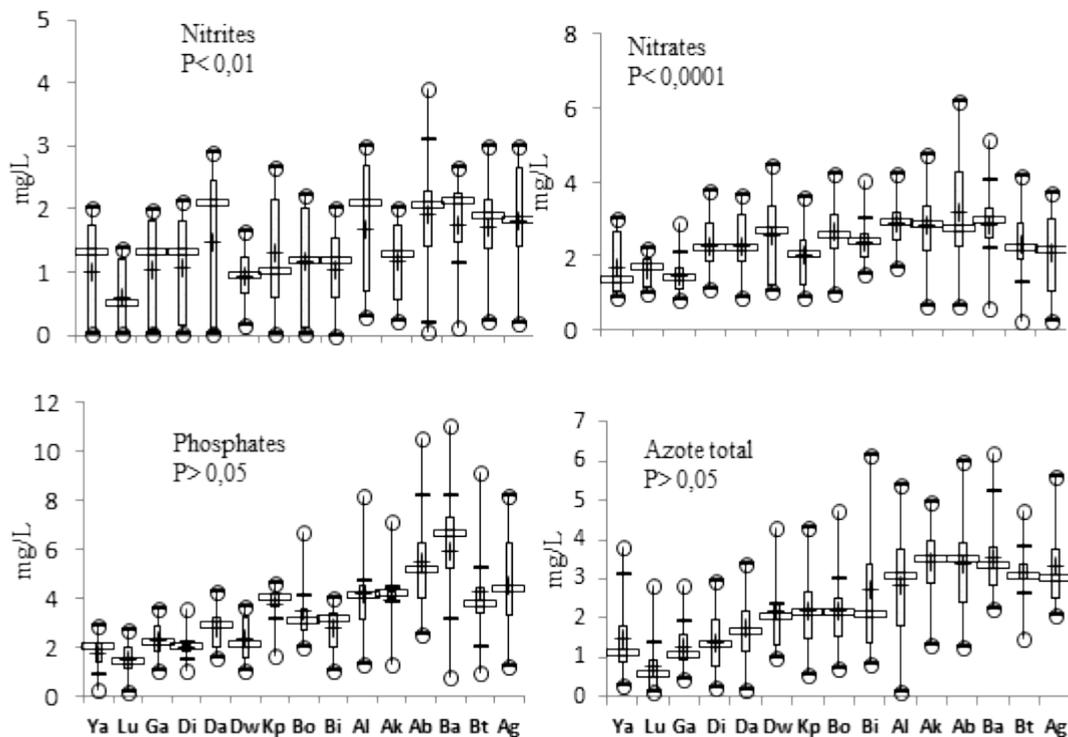


Figure 3 : Variations spatiales des concentrations en sels dissous de la rivière Alibori

Ya= Yanningourou, Lu =Lougou, Ga= Ganroukoro, Di= Diadia1, Da = Diadia2, Dw= Dawong, Kp= Kpeborogou, Bo= Bourin, Bi=Biowerekourou, Al=Alibori, AK= Alibori K, Ab,= Alibori B, Ba= Batran 1, Bt= Batran 2, Ag= Angaradebou

Tableau 1 : Synthèse des résultats de tests de comparaison de Kruskal-Wallis des variations spatiales des paramètres physico-chimiques de la rivière Alibori

Paramètres	H	P	Significativité
Température (°C)	24,62	0,038	*
Profondeur (m)	51,42	0,000	***
Transparence	52,24	0,000	***
pH	58,76	0,000	***
Conductivité (µS / cm)	46,51	0,000	***
TDS (mg / L)	101,78	0,000	***
Oxygène dissous (mg / L)	55,04	0,000	**
Vitesse du courant (cm / s)	3,92	0,000	***
Nitrites (mg / L)	34,51	0,002	***
Nitrates (mg / L)	39,52	0,000	***
Phosphates (mg / L)	1,26	0,999	NS
Azote total	78,06	0,821	NS

Légende : NS = non significatif ; * = $P < 0,05$; *** = $P < 0,001$

3-3. Variations temporelles des paramètres physico-chimiques

La **Figure 4** présente les variations mensuelles des paramètres physico-chimiques de la rivière Alibori. Le **Tableau 2** synthétise les résultats du test de comparaison de Kruskal-Wallis sur les variables environnementales. Globalement, les valeurs les plus élevées de la température ont été notées pendant la saison sèche et les plus faibles au cours de la saison des pluies. Les valeurs maximales (32 °C) de la température ont été mesurées pendant les mois de novembre, de février et d'avril au cours de la saison sèche. La valeur minimale (26 °C) de la température a été notée en juillet pendant la saison pluvieuse. La variation mensuelle de la température n'a pas été significative (Test de Kruskal-Wallis, $p > 0,05$). La profondeur minimale (1,5 m) a été enregistrée aux mois de mai et de juin. La profondeur maximale (15,8 m) a été mesurée en août pendant la crue du fait d'installation de la saison des pluies. Pendant cette période, le lit de la rivière est caractérisé par un volume et un lux d'eau élevés. D'un mois à un autre, la variation de la profondeur a été très significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). La différence la plus significative se situe entre les mois d'août d'une part, et les mois de mars, avril et de mai d'autre part (Test de Mann-Whitney, $p < 0,05$). La plus forte valeur de la transparence (30 cm) a été observée en saison sèche pendant le mois d'avril. La plus faible valeur (5 cm) a été mesurée pendant les mois de juin, d'août et de décembre. Les eaux ont été globalement plus transparentes en saison sèche. A l'arrivée de la pluie avec des ruissellements, l'eau devient trouble. Cependant, la variation de ce paramètre physique de l'eau n'a pas été significative (Test de Kruskal-Wallis, $p > 0,05$). La conductivité suit la même tendance saisonnière où les faibles valeurs sont mesurées en saison sèche. Des grandes valeurs sont observées en saison des pluies où le charriage des terres agricoles augmente la conductivité. La valeur minimale de la conductivité (64 µS / cm) a été mesurée aux mois d'avril et de mai (saison sèche) puis la valeur maximale (446 µS / cm) a été enregistrée en novembre au cours de la saison des pluies. Toutes fois, les petites valeurs de la conductivité ont été aussi trouvées pendant les deux saisons. La variation mensuelle de la conductivité a été très significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). Elle est surtout marquée entre les mois de décembre, janvier, février et mars d'une part, et de juin d'autre part (Test de Mann-Whitney, $p < 0,001$). Les valeurs du pH sont plus faibles pendant la saison sèche et plus élevées au cours de la saison des pluies. Les mois d'avril et de mai sont les mois où la

plus faible valeur de pH (6,1) a été mesurée. La valeur maximale (9), par contre, a été enregistrée en novembre. Le pH n'a pas connu une variation mensuelle significative (Test de Kruskal-Wallis, $p > 0,05$). Pour les Solides Totaux Dissous (TDS), la valeur maximale (486 mg / L) a été mesurée en février pendant la saison sèche et la valeur minimale (38,78 mg / L) a été obtenue en juin au début de la saison des pluies. La variation mensuelle de la concentration en Solides Totaux Dissous a été significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,01$), notamment entre le mois d'août d'une part, et les mois les mois janvier, février et mars d'autre part (Test de Mann-Whitney, $p < 0,05$). La plus faible valeur de l'oxygène dissous (1,03 mg / L) a été notée en février (saison sèche) et la plus forte valeur (8,5 mg / L) a été enregistrée en juillet (saison des pluies). Globalement, les faibles teneurs de l'oxygène dissous ont été observées pendant la saison sèche et les fortes teneurs enregistrées au cours de la saison pluvieuse. La variation mensuelle de l'oxygène dissous a été très significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). La différence reste marquée entre juin d'une part, et janvier et février d'autre part. Le mois de juillet diffère aussi des mois de novembre et de décembre (Test de Mann-Whitney, $p < 0,01$). La variation mensuelle de la vitesse du courant a été très significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). Les valeurs maximales (86 cm / s) et minimales (850 cm / s) de la vitesse du courant ont été respectivement mesurées en janvier (saison sèche) et en juillet (saison des pluies). La vitesse d'écoulement de l'eau a été particulièrement forte pendant la crue et reste très élevée pendant toute la période de la saison pluvieuse. Les faibles valeurs de la vitesse du courant sont notées au cours de la saison sèche. La variation reste très significative entre le juin et tous les mois de la saison sèche. La même tendance est remarquée entre juillet et ces mois (Test de Mann-Whitney, $p < 0,001$).

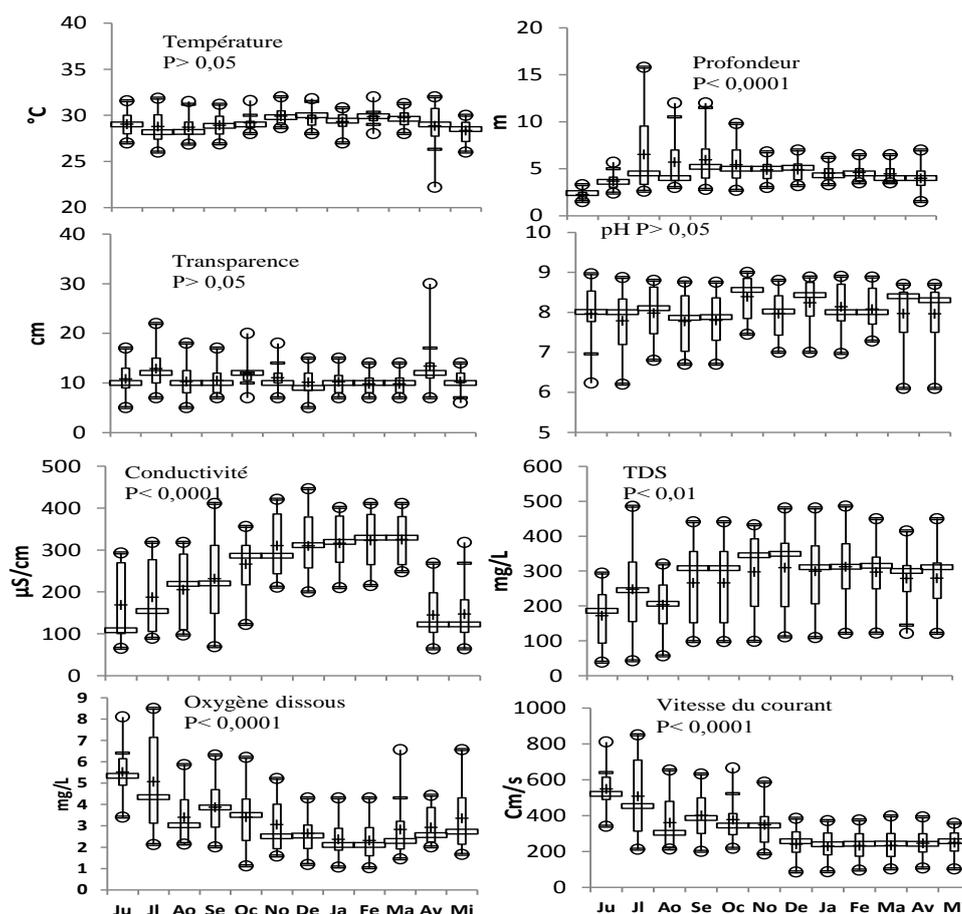


Figure 4 : Variations mensuelles des paramètres physico-chimiques de la rivière Alibori

Ju = juin, Jl = juillet, Ao = août, Se = septembre, Oc = octobre, No = novembre, De = décembre, Ja = janvier, Fe = février, Ma = mars, Av = avril, Mi = mai

3-4. Variations des temporelles en sels dissous

La **Figure 5** illustre les variations mensuelles des concentrations en nitrites, nitrates, en phosphates et Azote total. D'un mois à un autre, les concentrations en ions nitrites ont varié significativement (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,001$). La plus faible valeur (0,006 mg / L) et la plus forte valeur (3,9 mg / L) de la teneur en nitrites sont respectivement mesurées en juillet pendant la saison des pluies et en mai au cours de la saison sèche. La différence se remarque avec le mois de juin qui diffère significativement des mois de décembre, janvier, février et mars. La même variation significative s'observe entre juillet et ces quatre mois (Test de Mann-Whitney, $p < 0,01$). La valeur maximale des nitrates (6,15 mg / L) a été obtenue en juin (saison des pluies) et la minimale (0,25 mg / L) a été mesurée pendant les mois d'avril et de mai (saison sèche). La variation mensuelle des nitrates a été très significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$), notamment entre août, et janvier, février et mars (Test de Mann-Whitney, $p < 0,01$). De la même façon, les phosphates ont connu une variation très significative (Test de Kruskal-Wallis, $p < 0,0001$). La valeur la plus forte (11,011 mg / L) a été enregistrée en saison pluvieuse pendant le mois de septembre. Par contre, la valeur minimale (0,145 mg / L) a été mesurée en décembre au cours de la saison sèche. La différence est marquée entre août d'une part, et janvier, février et mars d'autre part. Le mois de septembre diffère aussi significativement de ces mois (Test de Mann-Whitney, $p < 0,01$). Pour l'azote total, sa teneur la plus faible (0,125 mg / L) a été notée pendant les mois de décembre, janvier et mars en saison sèche. La plus forte valeur (6,205 mg / L) de l'azote a été enregistrée en juillet (saison pluvieuse). La variation de la teneur en azote total n'a pas connu une fluctuation significative ($p > 0,05$). Dans l'ensemble, les grandes valeurs des nutriments sont observées pendant les mois de la saison des pluies et elles restent faibles en saison sèche. Les stations paraissent très minéralisées en saison des pluies.

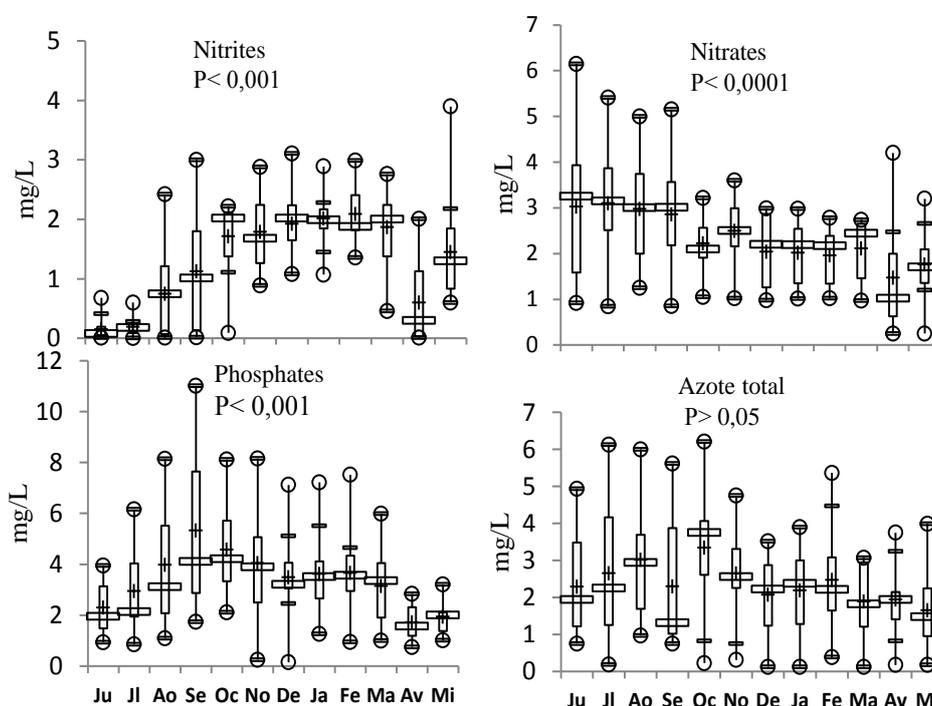


Figure 5 : Variations mensuelles des concentrations en sels dissous de la rivière Alibori

Ju = juin, Jl = juillet, Ao = août, Se = septembre, Oc = octobre, No = novembre, De = décembre, Ja = janvier, Fe = fevrier, Ma = mars, Av = avril, Mi = mai

Tableau 2 : Synthèse des résultats de tests de comparaison de Kruskal-Wallis des variations mensuelles des paramètres physico-chimiques de la rivière Alibori

Paramètres	H	P	Significativité
Température (°C)	23,5	0,015	*
Profondeur (m)	50,81	0,000	***
Transparence	17,28	0,1	NS
pH	11,45	0,431	NS
Conductivité (µS / cm)	78,58	0,000	***
TDS (mg / L)	27,89	0,003	**
Oxygène dissous (mg / L)	57,62	0,000	**
Vitesse du courant (cm / s)	71,97	0,000	***
Nitrites (mg / L)	96,62	0,00	**
Nitrates (mg / L)	40,46	0,000	***
Phosphates (mg / L)	45,98	0,000	***
Azote total	17,34	0,098	NS

Légende : NS = non significatif ; * = $P < 0,05$; *** = $P < 0,001$

3-5. Nature de sédiments

L'analyse de la composition du sédiment est illustrée à la **Figure 6**. Trois principaux faciès caractérisent la composition du sédiment de la rivière. La granulométrie est ainsi composée du sable, de la vase et du gravier.

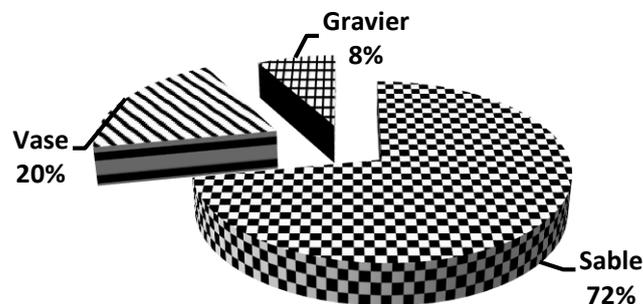


Figure 6 : Nature de sédiments du fond de la rivière Alibori

3-6. Corrélations et gradients des paramètres physico-chimiques

Les résultats de l'Analyse en Composantes Principales réalisée à partir des valeurs des paramètres physico-chimiques ont montré que les deux premiers axes expliquent 87,43 % de la variabilité totale des données (**Figure 8A**). La projection des stations d'échantillonnage dans le plan factoriel a montré trois groupes de stations. Le premier regroupe les stations Al, Ab, Ak, Ba, Bt et Ang situées en aval. Le second groupe a été formé des stations Ya, Lu, Ga, Di, Da et Dw situés en amont. Enfin, les stations Kp, Bi et Bo du cours moyen, se démarquent de toutes les autres stations en formant le troisième groupe (**Figure 7**). La projection des variables environnementales a donné un cercle de corrélation (**Figure 8B**) qui a montré que :

- l'axe F1 est fortement et négativement corrélé aux valeurs élevées de la conductivité, du TDS, de la

profondeur et les fortes teneurs en phosphate, en nitrites et en nitrates qui s'opposent aux fortes valeurs de la vitesse du courant, de la transparence de l'eau et de la concentration en oxygène dissous. Le cercle de corrélation révèle ainsi une corrélation entre les sels dissous, la conductivité et le TDS. De même, une corrélation a été remarquée entre la transparence et l'oxygène dissous ;

- l'axe F2 est fortement et positivement corrélé au pH qui s'oppose à une forte valeur des nitrates. Les Coefficients de corrélations de Pearson entre les trois premiers axes de l'ACP et les variables environnementales sont présentés au **Tableau 3**.

L'analyse de la carte factorielle et du cercle de corrélation présente une opposition entre les stations situées en amont dans la forêt classée de l'Alibori supérieur (Ya, Lu, Ga, Di, Da et Dw) et celles situées vers l'aval (Al, Ab, Ak, Ba, Bt, Ag). Cette opposition entre les stations d'amont et celles d'aval est réalisée suivant un gradient des paramètres physico-chimiques. En fin, un troisième groupe intermédiaire formé de Bi, Bo et kp se distingue des deux autres. Dans l'ensemble, les résultats de cette analyse mettent en évidence le long de l'axe 1 une succession des stations de l'amont vers l'aval qui résulte d'une différence dans la qualité physico-chimique des eaux de la rivière Alibori. La qualité des eaux du fleuve Alibori est nettement différente selon l'amont ou l'aval. Ainsi, l'amont est opposé à l'aval sur l'axe 1 par des facteurs tels que la conductivité, le TDS, la profondeur et les nutriments qui sont plus élevées en aval. Par contre, les autres facteurs tels que la transparence et l'oxygène dissous, sont élevés en amont. L'analyse indique une similarité entre les paramètres mesurés au niveau des trois grandes zones de la rivière : l'amont, le cours moyen et l'aval. Les caractéristiques physico-chimiques présentent des particularités qui diffèrent d'une zone à une autre. L'analyse présente également les stations de l'aval comme les plus polluées.

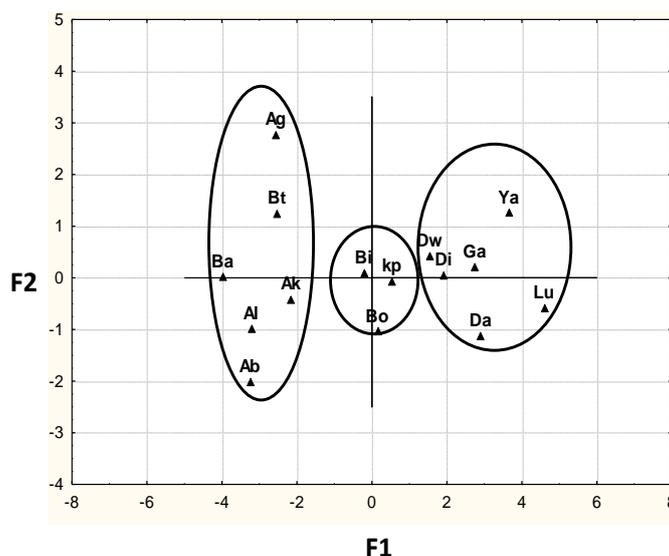


Figure 7 : Analyse en composantes principales sur les variables physico-chimiques (15 stations x 12 paramètres x 12 prélèvements)

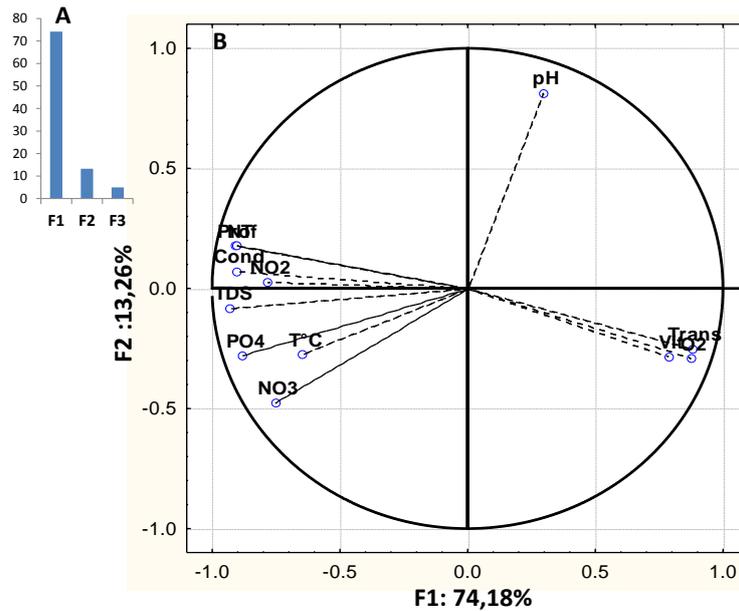


Figure 8 : Diagramme des valeurs propres (A) et cercle de corrélation sur le plan factoriel F1 x F2 des variables environnementales (B)

Légende : Temp = température, trans = transparence, O2d = concentration en oxygène dissous, Prof = profondeur, TDS = solide total dissous, Cond = conductivité, Vit = Vitesse du courant, pH = pH, NO₂ = Nitrites, NO₃ = Nitrate, PO₄ = Phosphates, NT = Azote total

Tableau 3 : Coefficients de scores basés sur les corrélations de Pearson entre les trois premiers axes de l'ACP et les variables environnementales

Variables	PC1	PC2	PC3
Température	- 0,081	- 0,204	0,148
Profondeur	- 0,714	0,13	- 0,053
Transparence	0,710	- 0,186	- 0,231
pH	0,037	0,602	0,455
Conductivité	- 0,813	0,051	- 0,306
TDS	- 0,907	- 0,062	0,099
oxygène dissous	0,711	- 0,217	0,296
Vitesse du courant	0,891	- 0,21	0,534
Nitrites	- 0,718	0,017	0,453
Nitrates	- 0,694	- 0,354	0,115
Phosphates	- 0,810	- 0,207	0,277
Azote total	- 0,113	0,13	0,069

4. Discussion

Les caractéristiques physico-chimiques de la rivière analysées dans ce travail montrent que les variations de température (26 °C à 31,86 °C) s'intègrent parfaitement dans la fourchette de température qui offre des conditions idéales de vie aux espèces piscicoles [10]. Cette fluctuation de température s'accorde, par ailleurs,

à celle signalée par d'autres études dans le bassin de la rivière Alibori [14]. La transparence, caractérisée par des faibles valeurs (5 à 22 cm) durant l'étude, a été un paramètre physique des eaux de la rivière Alibori qui a connu une variation spatiale très significative. A l'échelle de l'espace, la forte turbidité des eaux a connu ainsi, une évolution croissante de l'amont vers l'aval pendant cette étude. Le profil de variation de la conductivité et du TDS a connu aussi le même type d'évolution où les valeurs les plus élevées de ces paramètres ont été enregistrées au niveau des stations de l'aval. Ces résultats respectent le principe de transport des matériaux dans une rivière où les éléments les plus grossiers se déposent d'abord, puis les graviers, les sables, les particules fines et les plus fines de la source à l'embouchure modulant ainsi le faciès du fond de la rivière. La forte charge des substances contenues dans l'eau suivant un profil de variation amont-aval se justifie donc en partie par la circulation et le transport des matériaux [15]. Les valeurs très révélées de ces paramètres mettent aussi en exergue une autre situation qui pourrait être liée à l'intensification des activités agricoles le long de la rivière et l'accumulation des matières au niveau des stations de l'aval. Le résultat traduit une eau très minéralisée (conductivité supérieure à 100 $\mu\text{S} / \text{cm}$) et très chargée en matière dissoutes. Ce phénomène explique facilement les faibles valeurs de la transparence de l'eau obtenues et incriminent d'avantage les activités agricoles réalisées dans le bassin de la rivière.

En effet, la position des champs par rapport au cours d'eau, provoque, par le phénomène de lessivage, le chargement des eaux par les rejets agricoles qui sédimentent dans la rivière [10, 16]. A l'échelle du temps, la turbidité des eaux observée en saison pluvieuse est intimement liée à l'intensité des pluies et au ruissellement des eaux qui s'ensuit sur des sols agricoles non encore couverts par la végétation [17]. A l'étiage, en revanche, des valeurs élevées de la transparence et du pH sont notées globalement sur la rivière au cours de l'étude. L'oxygène dissous a présenté des valeurs inférieures à 3 mg / L et renseigne sur la qualité pas assez bonne de l'eau [18]. Les faibles valeurs du taux d'oxygène dissous ont été obtenues au niveau des stations de l'aval pendant les mois d'août et septembre où on note une intensification des activités cotonnières [4, 19]. Cet état pourrait être justifié en partie par les fortes teneurs en matières solides en suspensions observées car ; les matières solides biodégradables contribuent de façon significative à la demande en oxygène et occasionnent la diminution de la concentration en oxygène dissous dans le milieu aquatique [20]. L'utilisation des fertilisants en saison pluvieuse, favorise le développement des plantes aquatiques et contribuent sérieusement à la diminution des teneurs en oxygène [21]. Les nitrites, qui proviennent des nitrates sous l'influence des bactéries, ont présenté des concentrations supérieures à la limite admissible de 0,006 mg / L correspondant au seuil inférieur de toxicité aigüe [22].

Les fortes concentrations supérieures à 3 mg / L observées, constituent un problème inquiétant pour la qualité de l'eau [17]. Ces fortes concentrations de nitrites s'expliquent aisément par les fortes concentrations de nitrates et les faibles teneurs en oxygène dissous qui règnent dans les eaux de la rivière Alibori [23]. Par ailleurs, la plupart des valeurs de concentration en phosphates obtenue pendant cette étude est supérieure à la limite admise. En effet, les concentrations de phosphore dans l'eau supérieures à 0,5 mg / L doivent être considérées comme un indice de pollution [10]. La forte concentration de phosphore est synonyme d'un problème écologique sérieux car elle favorise l'eutrophisation. Les fortes concentrations ont été obtenues en septembre au niveau des stations situées en aval de la rivière. Les pratiques agricoles dans la zone où il est noté une forte utilisation des engrais minéraux notamment les engrais phosphatés et azotés à une quantité parfois au-delà des prescriptions techniques, justifient le niveau de concentration de ces nutriments dans l'eau. Les faibles transparences de l'eau et les fortes conductivités obtenues s'expliqueraient alors par une eutrophisation des eaux qui se traduit par une croissance excessive des algues et un appauvrissement de l'eau en oxygène, paramètre nécessaire à la vie des organismes. La conséquence est l'élévation du taux de mortalité chez certains organismes aquatiques. D'autres auteurs identifiaient aussi l'accumulation des engrais notamment le phosphore dans les sols agricoles comme la cause probable de contamination des

rivières en milieu rural et le phosphore en excès provoque l'eutrophisation [24]. Ce résultat est similaire à celui trouvé dans de la retenue d'eau de Kogbétohoué au sud du Bénin, qui signalait les activités agricoles du bassin versant comme les facteurs majeurs d'eutrophisation [10]. Les fortes concentrations des sels dissous observées à l'aval de la rivière témoignent d'une pollution des eaux qui évolue suivant un gradient amont-aval. Les résultats de l'application de l'Analyse en Composantes Principales sur les variables environnementales, confirment cette hypothèse et indiquent une pollution des stations de l'aval. Cette situation pourrait être justifiée par le ruissellement et le drainage des intrants agricoles, qui se sédimentent à l'aval de la rivière [2, 16].

5. Conclusion

L'étude de la qualité physico-chimique des eaux de la rivière révèle un gradient amont-aval et définit une zonation longitudinale de la rivière Alibori. La plupart des nutriments présentent des concentrations au-dessus des normes et témoignent d'un risque élevé d'eutrophisation. L'analyse spatio-temporelle des paramètres montre une évolution de la pollution de l'amont vers l'aval. Elle indique l'influence des activités agricoles sur les eaux de la rivière et présente les stations situées en aval comme les plus perturbées. La connaissance de ces conditions abiotiques permet d'apprécier l'équilibre écologique du cours d'eau et d'envisager en même temps l'utilisation des organismes qui y vivent comme bioindicateurs, pour la détermination de son état de santé.

Références

- [1] - M. DE JONGE, B. V. DE VIJVER, R. BLUST and L. BERVOETS, "Responses of aquatic organisms to metal pollution in a lowland river in Flanders : A comparison of diatoms and macroinvertebrates", *Science of the Total Environment*, 407 (2008) 615 - 629
- [2] - V. MINAYA, M. E. MCCLAIN, O. MOOG, F. OMENGO and A. SINGER, "Scale-dependent effects of rural activities on benthic macroinvertebrates and physico-chemical characteristics in headwater streams of the Mara River, Kenya" *Ecological indicators*, 32 (2013) 116 - 12
- [3] - L. U. HEPP, S. V. MILESI and R. M. RESTELLO, "Effects of agricultural and urban impacts on macroinvertebrates assemblages in streams (Rio Grande do Sul, Brazil)", *Sociedade Brasileira de Zoologia*, 27 (2010) 106 - 113
- [4] - T. P. AGBOHESSI, I. IMOROU TOKO and P. KESTEMONT, "Etat des lieux de la contamination des écosystèmes aquatiques par les pesticides organochlorés dans le bassin cotonnier béninois", *Cahier d'Agriculture*, 21 (2012) 46 - 56
- [5] - M. P. SILVEIRA, D. F. BUSS, J. I. NESSIMIAN and D. F. BAPTISTA, "Spatial and temporal distribution of benthic macroinvertebrates in a southeastern Brazilian river", *Braz. J. Biol.* (2006) 623 - 632
- [6] - A. KA. MEHARI, A. WONDIE M. MINGIST and J. VIJVERBERG, "Spatial and seasonal variation in the macroinvertebrates and physico-chemical parameters of the Enfranz River, Lake Tana sub-basin (Ethiopia)", *Ecology and Hydrobiology*, 14 (2014) 304 - 312
- [7] - Y. C. JUN, D. H. WO, S. H. LEE, D. S. KONG and S. J. HWANG, "A Multimetric Benthic Macroinvertebrate Index for the Assessment of Stream Biotic Integrity in Korea", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, (2012) 1660 - 1698
- [8] - L. LE BARBE, G. ALE, B. MILLET, H. TEXIER et L. BORE, "Monographie des ressources en eaux superficielles de la République du Bénin", *ORSTOM Paris*, (1993) 540 p.

- [9] - L. B. Bio Bigou, "La vallée bénino-nigérienne du fleuve Niger : Population et développement économique", *Thèse de Doctorat (nouveau régime)* Université de Bourgogne, (1987) 917 p.
- [10] - C. J. NOUMON, D. MAMA, C. A. DEDJIHO, E. AGBOSSOU et S. IBOURAIMA, "Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation de la retenue d'eau de Kogbétouhou (Sud-Bénin)", *Journal of Applied Biosciences*, 85 (2015) 7848 - 7861
- [11] - A. INTES et P. LE LOEUFF, "Les Annelides Polychètes de Côte d'Ivoire. IV- Relation faune-sédiments", *cahier ORSTOM série océanographie*, 21 (1986) 53 - 88
- [12] - D. ADANDEDJAN, "Diversité et déterminisme des peuplements de macroinvertébrés benthiques de deux lagunes du Sud- Bénin : la Lagune de Porto-Novo et la Lagune Côtière", *Thèse de doctorat* Université d'Abomey-Calavi, (2012) 261 p.
- [13] - C. MONTEIL, "Macro Boîtes à moustaches juxtaposées", INP/ENSAT Toulouse (2005) ", [http:// inp.toulouse.fr/excel-interactif/BoxPlots.xls](http://inp.toulouse.fr/excel-interactif/BoxPlots.xls)
- [14] - E. F Aboudou, "Caractérisation de la diversité et de la structure des macroinvertébrés benthiques du bassin cotonnier Béninois : Banikoara, Kandi, Gogounou", *Thèse d'Ingénieur* Agornome Université de Parakou, (2010) 94 p.
- [15] - S. AHOANSOU MONTCHO, "Diversité et exploitation des poissons de la rivière Pendjari (Bénin, Afrique de l'Ouest)", *Thèse de Doctorat* Université d'Abomey-Calavi, (2011) 234 p.
- [16] - L. FOURRIE, C. BUTLER, T. CASTILLON, D. HANOCQ, M. FOUGERE, P. LEVASSEUR, C. GASCUEL, JM. DORIOZ, C MOREL, C. RAISON et C. AUBERT, "Le phosphore d'origine agricole : diagnostics et solutions pour limiter les transferts vers le milieu aquatique", *Bulletin Ifremer*, 2 (2011) 12 - 89
- [17] - D. DIANOU, B. SAVADOGO, D. ZONGO, T. ZOUGOURI, J. N. PODA, H. BADO et F. ROSILLON, "Qualité des eaux de surface dans la vallée du Sourou : cas des rivières Mouhoun, Sourou, Debe et Gana au Burkina Faso", *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 5 (4) (2011) 1571 - 1589
- [18] - F. DOVONOU, M. AINA, M. BOUKARI et A. ALASSANE, "Pollution physico-chimique et bactériologique d'un écosystème aquatique et ses risques écotoxicologiques : cas du lac Nokoue au Sud Benin", *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 5 (4) (2011) 1590 - 1602
- [19] - T. P. AGBOHESSI, I. IMOROU TOKO, A. J. YABI, C. F. J. DASSOUNDO et P. KESTEMONT, "Caractérisation des pesticides chimiques utilisés en production cotonnière et impacts sur les indicateurs économiques dans la commune de Banikoara au nord du Bénin", *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 5 (4) (2011) 1828 - 1841
- [20] - C. A. DEDJIHO, D. MAMA, B. F. DIMON, W. CHOUTI, A. LASSANE, E. D. FIOGBE et C. K. D. SOHOUNHLOUE, "Influence de l'état d'eutrophisation de la lagune de Gbèzoumè (Ouidah) sur sa faune aquatique", *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 7 (5) (2013) 2069 - 2077
- [21] - A. G. MADJIKI, A. C. PIAL, N. J. R. NDAM et A. AMOUGOU, "Caractérisation hydrologique, morphométrique et physicochimique d'un hydrosystème urbain : le lac municipal d'Ebolowa (Sud-Cameroun)", *Afrique SCIENCE*, 09 (3) (2013) 122 - 134
- [22] - D. MAMA, "Méthodologie et résultats du diagnostic de l'eutrophisation du lac Nokoué (Bénin)", *Thèse de doctorat* Université de Limoges, (2010) 157 p.
- [23] - H. L. ZINSOU, A. H. ATINGLI, P. GNOHOSSOU, D. ADANDEDJAN, P. LALEYE, "Caractéristiques physico-chimiques et pollution de l'eau du delta de l'Oueme au Benin", *Journal of Applied Biosciences*, 97 (2006) 9163 - 9173
- [24] - M. PATOINE et M. SIMONEAU, "Impacts de l'agriculture intensive sur la qualité de l'eau des rivières au Québec", *Vecteur Environnement*, 35 (1) (2002) 61 - 66