

Qualité Physico-chimique des Eaux de Surface de l'Ouémé Supérieur au Bénin

Nonvignon Martial Fassinou

Fadéby Modeste Gouissi

Souradjou Orou Goura

Wakili Bolatito Yessoufou

Tayéwo Sylvain Biaou

Kpessou Hopson Kakpo

Université de Parakou (UP), Faculté d'Agronomie (FA), Laboratoire d'Ecologie, de Santé et de Productions Animales (LESPA), Parakou, Bénin

Hervé Hotèkpo Akodogbo

Université d'Abomey-Calavi (UAC). Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC). Laboratoire de Recherche en Biologie Appliquée (LARBA), Cotonou, Bénin

Dagbédjé Damien Toffa

Université d'Abomey Calavi (UAC), Laboratoire d'Hygiène, d'Assainissement, d'Ecotoxicologie et de Santé Environnementale (HECOTES) / CIFRED, Jericho, Cotonou, Benin

Doi: [10.19044/esipreprint.1.2023.p595](https://doi.org/10.19044/esipreprint.1.2023.p595)

Approved: 29 January 2023

Posted: 31 January 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

Cite As:

Fassinou N.M., Gouissi F.M., Goura S.O. Yessoufou W.B., Biaou T.S., Kakpo K.H., Akodogbo H.H. & Toffa D.D. (2023). *Qualité Physico-chimique des Eaux de Surface de l'Ouémé Supérieur au Bénin*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.1.2023.p595>

Résumé

Le présent travail vise à apprécier la qualité physico-chimique des eaux de l'Ouémé supérieur au Bénin. L'étude concerne Quatre (04) communes. Les données ont été collectées en Octobre 2021 et en Mars 2022. Les paramètres physiques in-situ et les paramètres chimiques au laboratoire ont été étudiés. La description par les box plots (Boîtes à moustaches), le test de Shapiro-Wilk et celui de Kruskal Wallis au seuil $\alpha = 5\%$ ont été utilisés. Les paramètres tels la salinité, $^{\circ}\text{C}$, NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} et le Cl^- sont significativement différents des autres paramètres et ne respectent pas les normes des eaux de surface. Les résultats de la

Classification Hiérarchique Ascendante (CAH) ont permis d'identifier trois groupes. Le groupe 1, constitué de : pH, OD, Salinité, NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} et le Cl^- ; proviennent principalement des activités agricoles et des eaux usées. Le groupe 2, constitué de : °C, STD et la DCO ; proviennent des différents éléments chimiques solubles dans l'eau. Le groupe 3, constitué de : CE, provient de la minéralisation globale de l'eau. L'eau est alors contaminée à travers les constituants physico-chimiques évalués.

Mots-clés: Pollution, Eau de surface, Qualité physico-chimique, Ouémé supérieur, Bénin

Physico-chemical Quality of Surface Water of Upper Ouémé in Bénin

Nonvignon Martial Fassinou

Fadéby Modeste Gouissi

Souradjou Orou Goura

Wakili Bolatito Yessoufou

Tayéwo Sylvain Biaou

Kpessou Hopson Kakpo

Université de Parakou (UP), Faculté d'Agronomie (FA), Laboratoire d'Ecologie, de Santé et de Productions Animales (LESPA), Parakou, Bénin

Hervé Hotèkpo Akodogbo

Université d'Abomey-Calavi (UAC). Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC). Laboratoire de Recherche en Biologie Appliquée (LARBA), Cotonou, Bénin

Dagbédji Damien Toffa

Université d'Abomey Calavi (UAC), Laboratoire d'Hygiène, d'Assainissement, d'Ecotoxicologie et de Santé Environnementale (HECOTES) / CIFRED, Jericho, Cotonou, Benin

Abstract

This work aims to assess the physico-chemical quality of the waters of the upper Ouémé in Benin. The study covered four (04) communes. The data was collected in October 2021 and March 2022. The in-situ physical parameters and the chemical parameters in the laboratory were studied. The description by the box plots, the Shapiro-Wilk test and the Kruskal Wallis test at the threshold $\alpha = 5\%$ were used. The parameters such as salinity, NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} and the Cl^- are significantly

different from the other parameters and do not respect the standards of the surface water. The results of the Hierarchical Ascending Classification (HAC) have helped us to identify three groups. The group 1, made up of: pH, DO, Salinity, NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} and the Cl⁻; come mainly from agricultural activities and wastewater. The group 2, made up of: °C, STD and COD; come from the different chemical elements that are soluble in water. The group 3, made up of: CE, comes from the global mineralization of water. The water is then contaminated through the physico-chemical constituents which have been evaluated.

Keywords: Pollution, Surface water, Physico-chemical quality, Upper Ouémé, Bénin

1. Introduction

L'eau est une ressource vitale qui est inégalement répartie dans le monde. Le maintien de sa qualité est une préoccupation majeure pour toute société qui doit subvenir à des besoins considérables (Talhaoui et al., 2020). Les eaux de surface sont exploitées à des fins diverses et servent de dépotoirs des déchets divers et des collecteurs (Adjagodo et al., 2017). En effet, ces rejets augmentent la charge en matières organiques des eaux superficielles et leur contamination peut se répercuter sur la chaîne alimentaire (Kougblenou et al., 2018). Or, l'accès à une eau saine demeure un droit et une composante clé des politiques de protection sanitaire (Sokegbe et al., 2017). Cette inquiétude, concerne non seulement les préoccupations liées à la production et la qualité des produits mais également la protection de l'environnement (Diallo et al., 2015). Au Bénin, les plans et cours d'eau sont affectés par plusieurs formes de pollution qui sont liées notamment à la croissance démographique (Houngpè et al., 2017). L'accessibilité à une l'eau de boisson est au cœur de la plupart des problèmes de santé publique que connaissent les pays en voie de développement (Coffi et al., 2020). De ce fait, la pollution agricole retient l'attention du fait de ses effets néfastes sur la qualité et les fonctions des cours d'eaux (Lawani et al., 2017). Elle est due surtout à l'utilisation intensive et abusive des engrais et pesticides (Adjagodo et al., 2016). Pour limiter la pollution des eaux, des stratégies sont mises en place par les décideurs à tous les niveaux (Dovonou et al., 2011). La dégradation de la qualité de ces eaux proviennent des activités agricoles, des effluents domestiques rejetés dans le milieu récepteur sans traitement préalable (Kpidi et al., 2017). Face à cette situation qui devient critique malheureusement dans le temps, il urge de faire un suivi régulier et permanent de la qualité de l'eau afin de corriger et de préserver. C'est un problème de l'épanouissement des êtres vivants : la santé des animaux, des êtres humains, des poissons, et de certains végétaux pourront en subir de

grandes conséquences si les causes de la pollution ne sont pas clairement identifiées et traitées. Malgré les nombreuses investigations menées dans le sens de la qualité physico-chimique des eaux de surface, la disponibilité en eau de meilleure qualité restera et demeurera toujours l'une des préoccupations sanitaires dans nos villes et campagnes qui connaissent aujourd'hui un essor démographique. La présente étude vise à apprécier la qualité physico-chimique des eaux de surface pendant les périodes des hautes eaux et des basses eaux de l'Ouémé supérieur au Bénin.

2. Matériel et méthodes

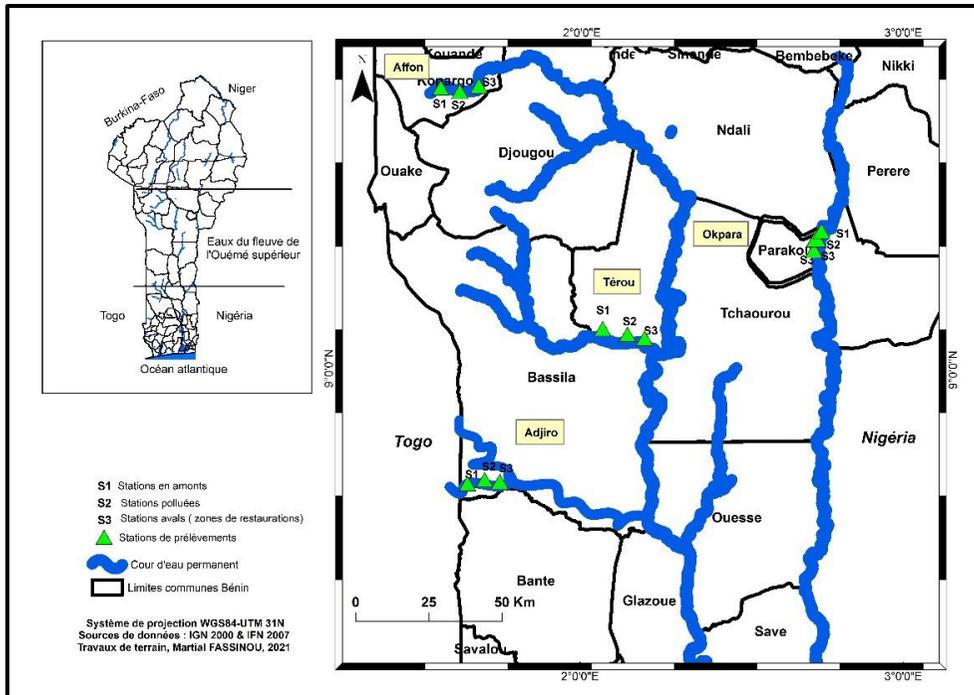
2.1. Milieu d'étude

Situé entre 6°30' et 10° de latitude Nord et 0°52' et 3°05' de longitude Est ; l'Ouémé supérieur est située au centre du Bénin avec une longueur de 510 km (Abahi et al., 2018). L'Ouémé supérieur, étant le plus long fleuve du pays (510 km), il prend sa source dans les monts de Tanéka et reçoit deux principaux affluents importants : L'Okpara (200 km) sur la rive gauche et le Zou (150 km) sur la rive droite. Il subit les influences des climats soudanien et subéquatorial, mais son régime est plutôt tropical (PANA, 2007). Quatre (04) stations d'échantillonnage ont fait l'objet de l'étude.

2.2. Choix des stations d'échantillonnage

Les stations ont été choisies en fonction de l'accessibilité de l'eau en toute saison, la position des stations par rapport aux champs ; le gradient de pollution et de la profondeur (moins d'un mètre) de cette eau. Au niveau de chaque station, nous avons procédé à trois différents prélèvements sur le bras de même ordre afin d'éviter le mélange d'autre source de pollution. Ainsi, nous avons fait au niveau de chaque station ; un prélèvement en amont (représentant la zone témoin), un prélèvement dans la zone polluée et un prélèvement dans une zone de reconstitution ou de restauration (l'aval).

Le choix des stations a été faite, suite à une visite exploratoire de l'amont pour la zone polluée et vers la zone de reconstitution sur la partie supérieure du fleuve Ouémé et a permis de retenir 04 stations (Okpara, Térrou, Affon et Adjiro) accessibles en toute saison. L'étude prend en compte quatre (04) communes à raison de (03) stations de prélèvement par commune. La figure 1 montre le plan d'eau de l'Ouémé supérieur traversant le pays.



2.3. Description des stations de prélèvement

2.3.1. Station Okpara

Elle est située à $9^{\circ}21'08''$ N et $2^{\circ}44'20''$ E dans le département du Borgou dans la commune de Parakou. La pluviométrie annuelle varie entre 900 mm et 1300 mm par an. Les sols hydromorphes se retrouvent dans les vallées le long de l'Okpara. Les sols ferrugineux sont dans les rocs cristallins à dominance *Isoberlinia doka*, *Burkea africana*, *Mangifera indica*, et des plantations de Teck (*Tecktona grandis*).

2.3.2. Station Téro

Elle est située à $9^{\circ}05'16''$ N et $2^{\circ}05'32''$ E dans le Borgou-sud est traversé par la rivière Téro, recevant une pluviométrie annuelle variant de 1100 mm à 1200 mm. Les sols sont ferrugineux situés sur les rocs cristallins entourés par des forêts riveraines et des forêts sèches et dominé par les espèces telles que *Tetrapleura andongensis*, *Diospyros mespiliformis*, *Anacardium occidentale*, *Mangifera indica*.

2.3.3. Station Affon

Située à $8^{\circ}52'29''$ N et $1^{\circ}30'51''$ E dans le département de la Donga, commune de Copargo, arrondissement de Tanéka koko. Elle a une pluviométrie annuelle comprise entre 1000 - 1200 mm. Le sol est peu évolué

et contient que des minéraux. La formation végétale est constituée des forêts riveraines, sèches et des forêts boisées à dominance *Terminalia brownii*, *Commiphora pedunculata*, *Thunbergia atacoriensis*, *Garcinia ovalifolia*, *Gardenia imperialis*. Les exploitations minières se font dans ces eaux.

2.3.4. Station Adjiro

Elle est située à 8°36'50'' N et 1°40'51'' E dans le département de la Donga, commune de Bassila. La station Adjiro est une galerie forestière située dans la forêt de Monts couffées, une forêt riveraine recevant une pluviométrie annuelle supérieure à 1200 mm. Le sol est ferrallitique avec des concrétions et dominé par des espèces comme le *Khaya grandifolia*, *Aubrevillea kerstingii*, *Khaya senegalensis* et *Erythrophleum suaveolens*.

2.4. Collecte des données

2.4.1. Mesures et prélèvement des paramètres physico-chimiques de l'eau

Les mesures et prélèvements des eaux ont été faits entre 06h30mn à 10h45mn (Koudenoukpo et al.,2017). Nous avons effectué une recherche systématique sur quinze (15) paramètres physico-chimiques à raison de quatre (04) paramètres physiques tels que : La température, le pH, la conductivité électrique et le solide totaux dissous. Ensuite, onze (11) paramètres chimiques ; dont : , L'oxygène dissous, la salinité, le nitrate, le nitrite, l'ammonium, le phosphate, la dureté calcique, la dureté magnésium, la demande chimique en oxygène, le fer et le chlorure. Tous les paramètres ont été échantillonnés périodiquement, dont la saison pluvieuse allant de 11 Octobre 2021 à 12 Octobre 2021 d'une part, et de 16 Mars 2022 au 17 Mars 2022 pour la saison sèche d'autre part.

2.4.2. Matériel utilisé pour les prélèvements physico-chimiques

Le matériel qui a été utilisé dans les différentes analyses physico-chimiques est présenté dans le tableau 1. Le spectrophotomètre DR 6000 est utilisé au laboratoire pour les différents paramètres chimiques évalués à travers des méthodes spécifiques à chacun d'eux. Le tableau ci-dessous illustre de façon détaillée le matériel de collectes des paramètres physiques évalués.

Tableau 1. Matériel utilisé les prélèvements physiques et chimiques

Matériels	Utilisations
GPS	Prendre les coordonnées géographiques des différents sites de prélèvement.
Ruban adhésif	Numéroter les échantillons
Marqueur	Marquer chaque échantillon

pH-mètre	Mesurer le potentiel d'hydrogène et la température de l'eau
Oxymètre	Mesurer l'oxygène dissous de l'eau
Conductimètre	Mesurer la conductivité, la salinité et le TDS de l'eau
Micropipette	Prélever les petits volumes de solvant
Pipette graduée	Prélever les grands volumes d'eau
Cône bleu	Prélever les petits volumes de solvants
Rouge de phénol	Indicateur colorée pour mesurer le pH
Plastique de Fifa (1.5 L)	Contenir l'eau prélevée
Glacières	Conserver les échantillons à environ 4°C

2.5. Analyse des données

La description par les box plots a été utilisée en même temps avec le test de Shapiro-Wilk et celui de Kruskal Wallis au seuil $\alpha = 5\%$ au niveau de toutes les concentrations mesurées afin de faire une comparaison étroite à l'échelle des paramètres de la qualité des eaux de surface. La Classification Hiérarchique Ascendante (CAH) et a été réalisée afin de grouper les paramètres évalués et de donner les groupes d'accessions ou d'adjonctions. Les données statistiques ont été traitées dans le logiciel R version 3.5.0.

3. Résultats

3.1. Etude des paramètres

Une normativité suivant les normes recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et le Ministère de la Santé Publique (MSP) pour une eau de bonne qualité a été prise en compte. Le tableau 2 présente les normes d'une eau de bonne qualité.

Tableau 2. Valeurs de références des normes de MSP et de l'OMS

Paramètres	Unités	Symboles	Normes Bénin (MPS)	Normes OMS
Température	-	°C	~25	~25
Potentiel d'hydrogène	-	pH	6<pH<9	6,5<pH<9,5
Conductivité Electrique	$\mu\text{S}/\text{cm}$	CE	2000	< 1500
Solide Totaux Dissous	mg/L	TDS	2000	< 600
Oxygène Dissous	mg/L	OD	≥ 5	$5 \leq \text{OD} \leq 8$
Salinité	‰	-	-	-
Nitrate	mg/L	NO_3^-	45	< 50
Nitrite	mg/L	NO_2^-	3,2	< 0,1
Ammonium	mg/L	NH_4^+	0,5	-
Phosphate	mg/L	PO_4^{3-}	1	2
Dureté Calcique	mg/L	Ca^{2+}	100	200
Dureté Magnésienne	mg/L	Mg^{2+}	50	150
DCO	mg/L	DCO	125	90

Fer	mg/L	Fe	0,3	PVG
Chlorure	mg/L	Cl ⁻	250	≤ 250

PVG = Pas de Valeur Guide

Les box plots que montrent les figures 2 à 16 reflètent les concentrations caractéristiques sur chaque station, de la variation des paramètres mesurés en saison pluvieuse et en saison sèche.

3.1.1. Température (°C)

La température est un paramètre qu'on doit absolument mesurer sur le terrain. Elle tend à s'ajuster rapidement à la température ambiante. Moyennement, elle varie entre $26,93^{\circ}\text{C}\pm 0,53$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($25,9^{\circ}\text{C}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $27,29^{\circ}\text{C}\pm 1,11$ pendant la saison sèche ayant un minimum (26°C) dans l'amont. Au niveau de la station de Térrou, elle est à $28,63^{\circ}\text{C}\pm 1,24$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($27,4^{\circ}\text{C}$) se trouvant dans la zone polluée de prélèvement, contre $31,3^{\circ}\text{C}\pm 0,55$ pendant la saison sèche pour un minimum ($30,2^{\circ}\text{C}$) dans l'amont. Pour la station de Affon, il est constaté qu'elle varie entre $27,63^{\circ}\text{C}\pm 0,28$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($27,1^{\circ}\text{C}$) dans l'amont de prélèvement, contre $26,27^{\circ}\text{C}\pm 0,17$ pendant la saison sèche dont le minimum (26°C) se retrouve dans l'amont. Enfin à la station de Adjiro, elle varie entre $26,63^{\circ}\text{C}\pm 0,57$ pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum ($25,5^{\circ}\text{C}$) dans la zone polluée de prélèvement, contre $32,97^{\circ}\text{C}\pm 0,86$ pendant la saison sèche dont le minimum ($31,7^{\circ}\text{C}$) dans l'amont. La figure 2 montre les variations moyennes des températures pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des stations de l'Ouémé supérieur étudiées.

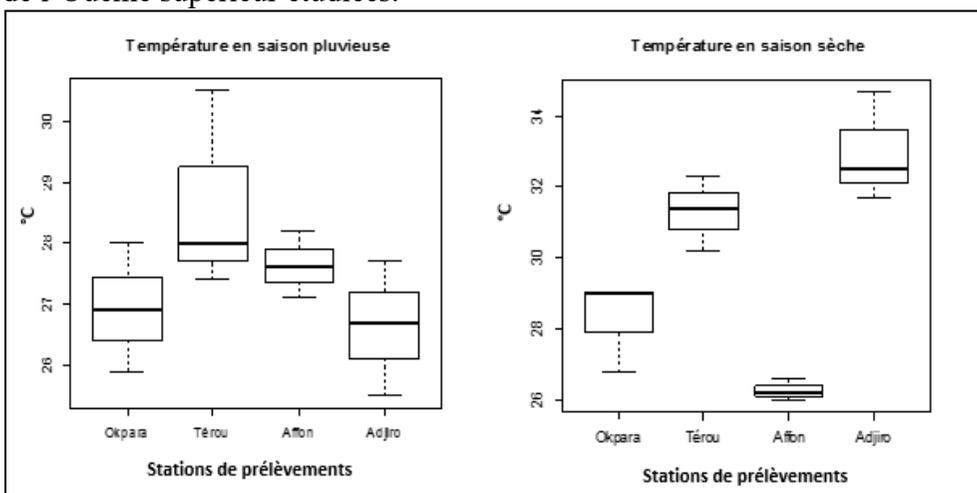


Figure 2. Variations moyennes des températures en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est mesuré sur le terrain, directement dans le cours d'eau et dans une bouteille d'eau dont nous jetons ensuite le contenu. La moyenne varie entre $6,53 \pm 0,68$ au niveau de la station de l'Okpara en saison pluvieuse avec un minimum (5,95) se trouvant dans la zone polluée de prélèvement, contre $5,84 \pm 0,03$ en saison sèche ayant un minimum (5,85) dans la zone polluée. A la station de Térrou, elle est à $7,49 \pm 0,30$ en saison pluvieuse avec un minimum (6,89) se trouvant dans la zone polluée de prélèvement, contre $5,88 \pm 0,05$ en saison sèche pour un minimum (5,77) dans la zone de reconstitution. Pour la station de Affon, il est constaté qu'elle varie entre $6,10 \pm 0,34$ en saison pluvieuse avec un minimum (5,64) dans la zone polluée de prélèvement, contre $5,74 \pm 0,01$ en saison sèche dont le minimum (5,73) se retrouve dans la zone de reconstitution. Enfin à la station de Adjiro, elle varie entre $5,82 \pm 0,29$ en saison pluvieuse ayant pour minimum (5,4) dans la zone polluée de prélèvement, contre $5,93 \pm 0,07$ en saison sèche dont le minimum (5,99) dans l'amont. La figure 3 montre les variations moyennes des potentiels d'hydrogènes pendant la saison pluvieuse et pendant la saison sèche des stations de l'Ouémé supérieur étudiées.

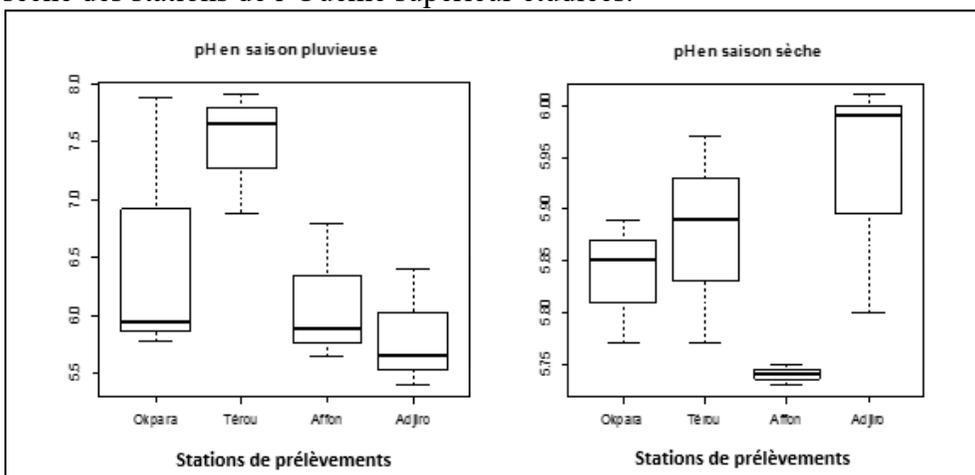


Figure 3. Variations moyennes des potentiels d'hydrogène en saison pluvieuse et en saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.3. Conductivité Electrique

La conductivité électrique est la transmission du courant électrique, qui est due à la concentration des ions. Moyennement, elle varie entre $58,47 \mu\text{s/cm} \pm 11,83$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($34,8 \mu\text{s/cm}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $48,57 \mu\text{s/cm} \pm 2,62$ pendant la saison sèche ayant un minimum ($44,8 \mu\text{s/cm}$) dans l'amont. Au niveau de la station de Térrou, elle est à $439,66 \mu\text{s/cm} \pm 197,17$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($157,5 \mu\text{s/cm}$) se

trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $125\mu\text{S}/\text{cm} \pm 15,75$ pendant la saison sèche pour un minimum ($93,5\mu\text{S}/\text{cm}$) dans l'amont. Pour la station de Affon, il est constaté qu'elle varie entre $14,32\mu\text{S}/\text{cm} \pm 3,99$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($9,36\mu\text{S}/\text{cm}$) dans l'amont de prélèvement, contre $14,95\mu\text{S}/\text{cm} \pm 3,37$ pendant la saison sèche dont le minimum ($10,34\mu\text{S}/\text{cm}$) se retrouve dans l'amont. Enfin au niveau de la station de Adjiro, elle varie entre $157,56\mu\text{S}/\text{cm} \pm 10,96$ pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum ($140,4\mu\text{S}/\text{cm}$) dans l'amont de prélèvement, contre $154,1\mu\text{S}/\text{cm} \pm 2,6$ pendant la saison sèche dont le minimum ($150,2\mu\text{S}/\text{cm}$) dans l'amont. La figure 4 montre les variations moyennes des conductivités électriques pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

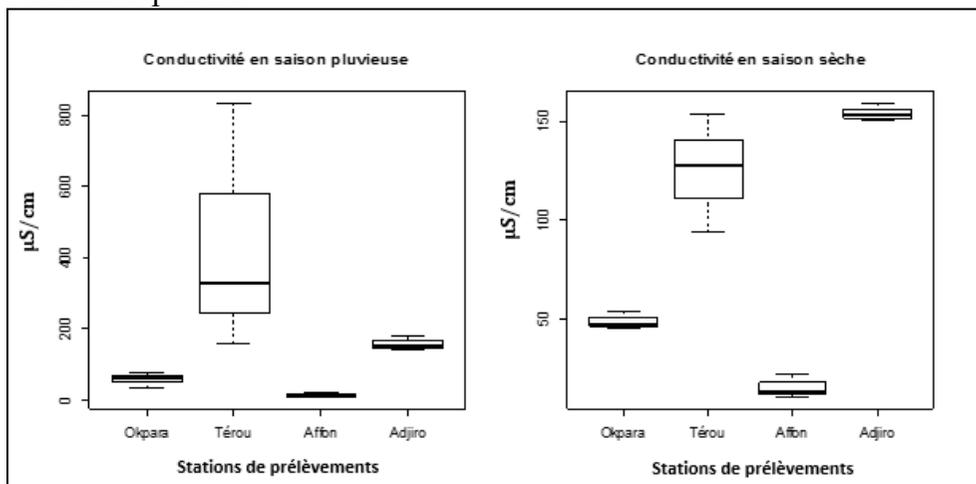


Figure 4. Variations moyennes des conductivités électriques en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.4. Solides Totaux Dissous (STD)

Les solides totaux dissous font partir des paramètres utiles dans l'évaluation de la qualité de l'eau. Ils varient entre $135,8\text{mg}/\text{L} \pm 68,1$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($10,1\text{mg}/\text{L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $22,7\text{mg}/\text{L} \pm 1,25$ dans la saison sèche ayant un minimum ($20,9\text{mg}/\text{L}$) dans l'amont. Au niveau de la station de Térou, ils sont à $429,7\text{mg}/\text{L} \pm 172,1$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($210,7\text{mg}/\text{L}$) se trouvant dans la zone de reconstitution de prélèvement, contre $67,1\text{mg}/\text{L} \pm 4,27$ pendant la saison sèche pour un minimum ($44,3\text{mg}/\text{L}$) dans l'amont. Pour la station de Affon, il est constaté qu'ils varient entre $7,2\text{mg}/\text{L} \pm 1,2$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($5,8\text{mg}/\text{L}$) dans la zone de reconstitution de prélèvement, contre $6,63\text{mg}/\text{L} \pm 1,63$ pendant la saison sèche dont le minimum ($4,4\text{mg}/\text{L}$) se retrouve dans l'amont. Enfin au niveau de la station de Adjiro, ils varient

entre $406,83\text{mg/L} \pm 84,58$ pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum ($271,6\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $73,5\text{mg/L} \pm 1,25$ pendant la saison sèche dont le minimum ($71,6\text{mg/L}$) dans l'amont. La figure 5 montre les variations moyennes des solides totaux dissous pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

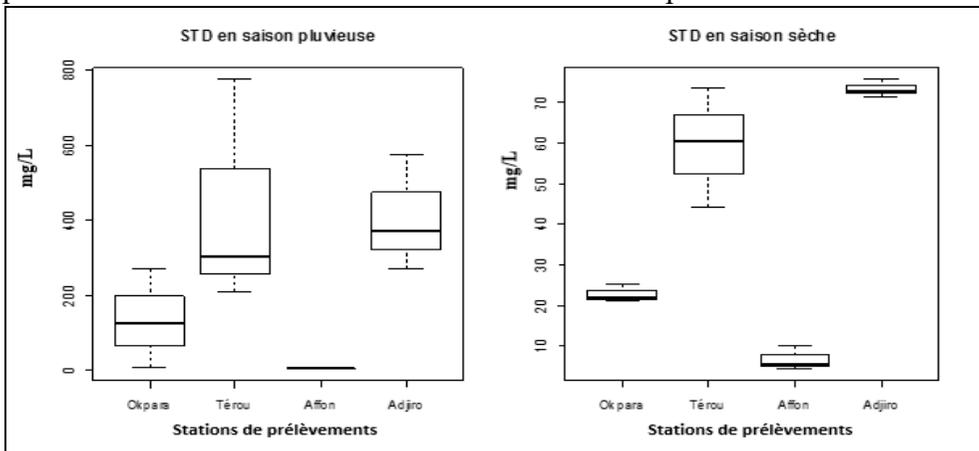


Figure 5. Variations moyennes des solides totaux dissous en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.5. Oxygène Dissous (OD)

La concentration de l'oxygène dissous dans l'eau est un paramètre qui peut facilement subir une modification au cours de la période de conservation. La moyenne varie entre $3,59\text{mg/L} \pm 0,63$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($2,47\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $3,79\text{mg/L} \pm 0,01$ pendant la saison sèche ayant un minimum ($3,77\text{mg/L}$) dans l'amont. A la station de Térou, elle est à $5,33\text{mg/L} \pm 0,61$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($4,3\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $6,1\text{mg/L} \pm 0,41$ pendant la saison sèche pour un minimum ($5,29\text{mg/L}$) dans la zone polluée. Pour la station de Affon, il est constaté qu'elle varie entre $5,79\text{mg/L} \pm 0,59$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($4,63\text{mg/L}$) dans la zone polluée de prélèvement, contre $5,95\text{mg/L} \pm 0,42$ pendant la saison sèche dont le minimum ($5,1\text{mg/L}$) se retrouve dans la zone de reconstitution. Enfin à la station de Adjiro, elle varie entre $5,00\text{mg/L} \pm 0,49$ pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum ($4,36\text{mg/L}$) dans la zone polluée de prélèvement, contre $7,93\text{mg/L} \pm 0,69$ pendant la saison sèche dont le minimum ($6,56\text{mg/L}$) est dans la zone polluée. La figure 6 montre les variations moyennes de l'oxygène dissous pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

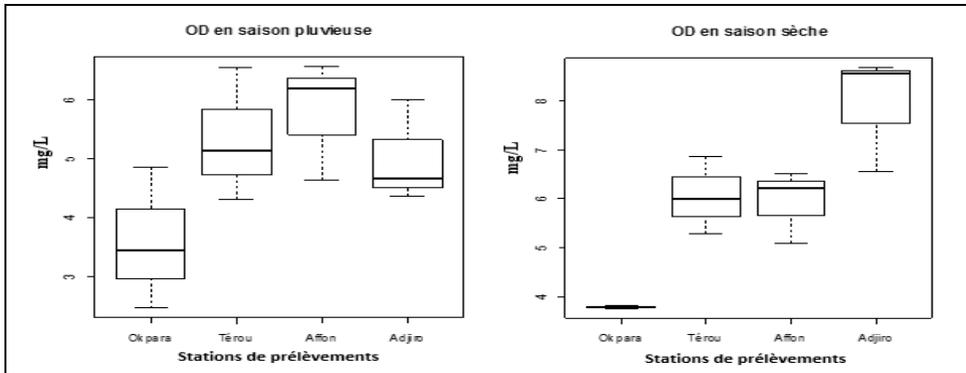


Figure 6. Variations moyennes des oxygènes dissous en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.6. Salinité

La salinité à la station de l'Okpara pendant la saison des pluies de même que pendant la saison sèche reste inchangeable, moyennement nul. C'est-à-dire $0,000/00 \pm 0,00$ dans les différents points de prélèvement. Au niveau de la station de Térou, elle est à $0,060/00 \pm 0,03$ pendant la saison pluvieuse ainsi que pendant la saison sèche, avec un minimum ($0,000/00$) se trouvant respectivement dans l'amont de prélèvement. Pour la station de Affon, il n'a pas une variation $0,000/00 \pm 0,00$ de la salinité pendant la saison pluvieuse de même pendant la saison sèche pour les différents prélèvements de l'amont, la zone polluée et la zone de reconstitution. Enfin au niveau de la station de Adjro, elle reste invariante entre $0,10/00 \pm 1,04e^{-17}$ bien que pendant la saison pluvieuse que la saison sèche. Toutes les valeurs obtenues de l'amont à la zone polluée et à la zone de reconstitution sont identiques, ce qui donne la nature de la salinité de l'eau de la station de Adjro dans la commune de Bassila. La figure 7 montre les variations moyennes de la salinité pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

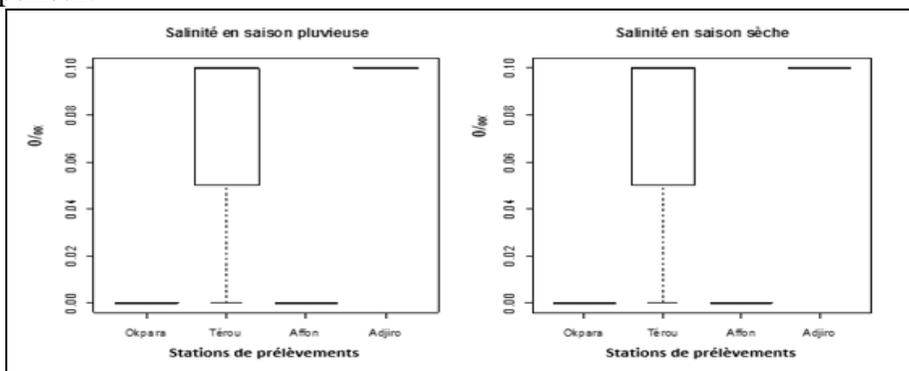


Figure 7. Variations moyennes des salinités en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.7. Nitrate (NO_3^-)

Les principales sources de nitrates sont les effluents industriels, municipaux et le lessivage des terres agricoles. La moyenne, varie entre $0,96\text{mg/L}\pm 0,03$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,9\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, de même que pendant la saison sèche. Dans la station de Térrou, elle est à $2,9\text{mg/L}\pm 2,2$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,7\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont et dans la zone de reconstitution de prélèvement, contre $0,57\text{mg/L}\pm 0,13$ pendant la saison sèche pour un minimum ($0,3\text{mg/L}$) dans la zone polluée. Pour la station de Affon, il est constaté qu'elle varie entre $1,4\text{mg/L}\pm 0,25$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($1,00\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $1,33\text{mg/L}\pm 0,12$ pendant la saison sèche dont le minimum ($1,1\text{mg/L}$) se retrouve dans l'amont de prélèvement. Enfin à Adjiro, elle varie entre $1,7\text{mg/L}\pm 0,65$ pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum ($0,8\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $1,00\text{mg/L}\pm 0,15$ pendant la saison sèche dont le minimum ($0,7\text{mg/L}$) est dans la zone de reconstitution. La figure 8 montre les variations moyennes des nitrates pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

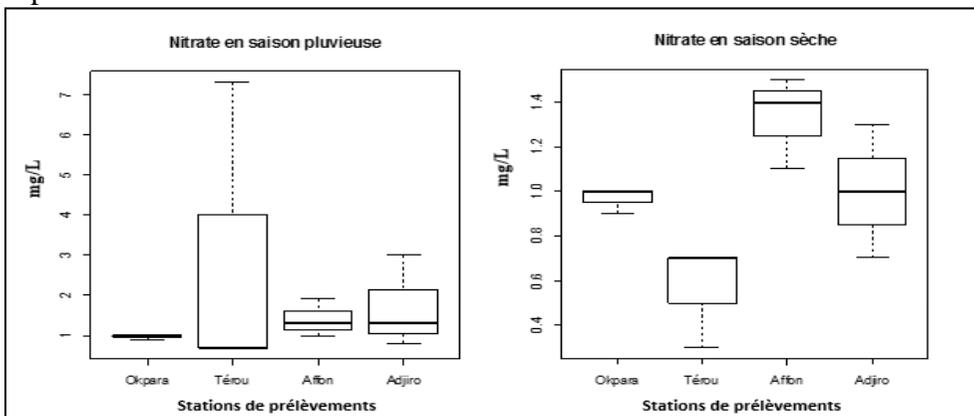


Figure 8. Variations moyennes des nitrates en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.8. Nitrite (NO_2^-)

Il se retrouve rarement en concentration importante dans les eaux naturelles. La moyenne varie entre $5,66\text{mg/L}\pm 0,83$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum (4mg/L) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $4\text{mg/L}\pm 0,0$ pendant la saison sèche, dont toutes les mesures ont les mêmes valeurs ; de l'amont à la zone polluée et la zone de reconstitution. Au niveau de la station de Térrou, elle est à $4,63\text{mg/L}\pm 0,73$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($3,7\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $5,66\text{mg/L}\pm 0,33$ pendant la

saison sèche pour un minimum (5mg/L) dans la zone de reconstitution. Pour la station de Affon, il est constaté qu'elle varie entre 5,66mg/L \pm 0,83 pendant la saison pluvieuse avec un minimum (4mg/L) dans l'amont de prélèvement, contre 4,66mg/L \pm 0,33 pendant la saison sèche dont le minimum (4mg/L) se retrouve dans la zone de reconstitution de prélèvement. Enfin au niveau de la station de Adjiro, elle varie entre 4,33mg/L \pm 0,33 pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum (4mg/L) dans la zone de reconstitution de prélèvement, ce qui en est de même pendant la saison sèche. La figure 9 montre les variations moyennes des nitrites pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

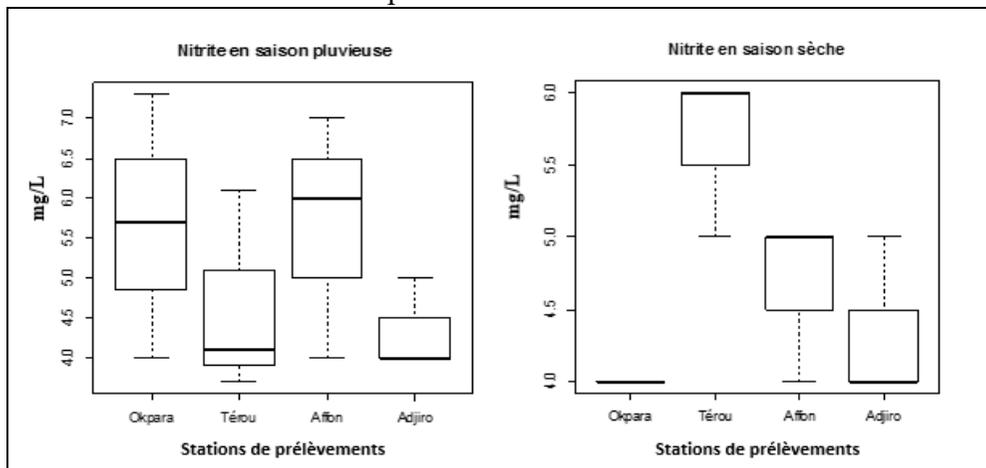


Figure 9. Variations moyennes des nitrites en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.9. Ammonium (NH₄⁺)

La moyenne de l'ammonium varie entre 0,20mg/L \pm 0,01 sur la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum (0,18mg/L) se trouvant dans la zone polluée de prélèvement, de même que pendant la saison sèche. Au niveau de la station de Térou, elle est à 0,58mg/L \pm 0,2 pendant la saison pluvieuse avec un minimum (0,9mg/L) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre 0,29mg/L \pm 0,05 pendant la saison sèche pour un minimum (0,17mg/L) dans la zone polluée. Pour la station de Affon, il est constaté qu'elle varie entre 0,03mg/L \pm 0,00 pendant la saison pluvieuse avec une constante (0,03mg/L) dans les différents points de prélèvement, contre 0,01mg/L \pm 0,0 pendant la saison sèche dont la constante (0,01mg/L) se retrouve dans les différents points de prélèvement. Enfin au niveau de la station de Adjiro, elle varie entre 0,65mg/L \pm 0,16 pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum (0,42mg/L) dans la zone polluée de prélèvement, contre 0,34mg/L \pm 0,04 pendant la saison sèche dont le minimum (0,3mg/L) est dans la zone de reconstitution. La figure 10 montre les variations moyennes de

l'ammonium pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

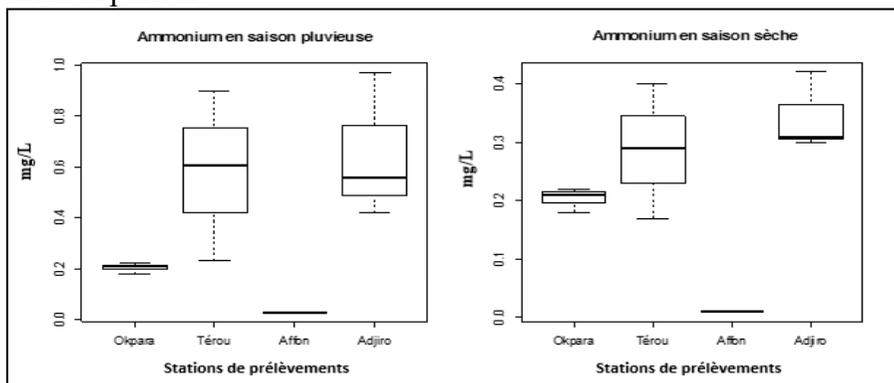


Figure 10. Variations moyennes de l'ammonium en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.10. Phosphate (PO_4^{3-})

Il est utilisé principalement comme engrais naturel ou chimique et dans les produits d'entretien pour ses qualités d'agent anticalcaire. Moyennement, il varie entre $0,14\text{mg/L} \pm 0,13$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,012\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $0,01\text{mg/L} \pm 0,001$ pendant la saison sèche ayant un minimum ($0,011\text{mg/L}$) dans la zone de reconstitution. A la station de Térou, elle est à $0,02\text{mg/L} \pm 0,01$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,001\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $0,017\text{mg/L} \pm 0,008$ pendant la saison sèche pour un minimum (0mg/L) dans l'amont. Pour Affon, il est constaté qu'elle varie entre $0,041\text{mg/L} \pm 0,02$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,041\text{mg/L}$) dans la zone de reconstitution de prélèvement, contre $0,013\text{mg/L} \pm 0,001$ pendant la saison sèche dont le minimum ($0,013\text{mg/L}$) se retrouve dans la zone de reconstitution. Enfin à la station de Adjiro, elle varie entre $0,11\text{mg/L} \pm 0,02$ pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum ($0,09\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $0,08\text{mg/L} \pm 0,01$ pendant la saison sèche dont le minimum ($0,06\text{mg/L}$) est dans la zone polluée. La figure 11 montre les variations moyennes des phosphates pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

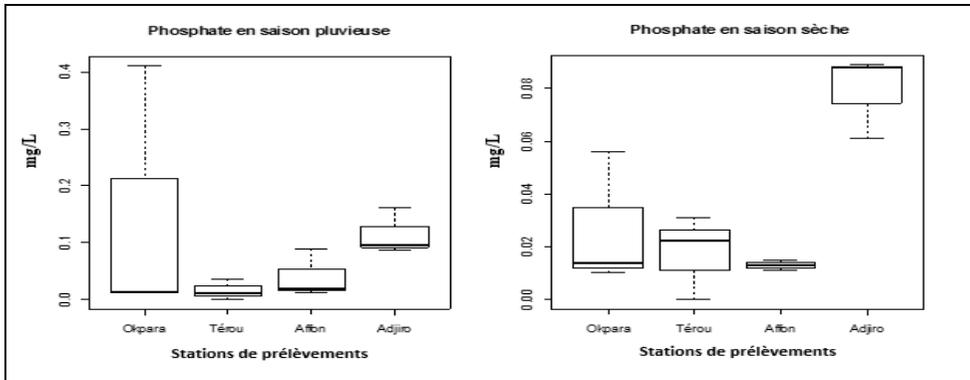


Figure 11. Variations moyennes des phosphates en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.11. Calcium

Il fait partie des éléments les plus répandus dans la nature. Moyennement, elle varie entre $0,09\text{mg/L} \pm 0,03$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,14\text{mg/L}$) se trouvant dans la zone de reconstitution de prélèvement, contre $0,08\text{mg/L} \pm 0,002$ pendant la saison sèche ayant un minimum ($0,06\text{mg/L}$) dans l'amont. A la station de Térou, elle est à $0,03\text{mg/L} \pm 0,01$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,02\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $0,12\text{mg/L} \pm 0,06$ pendant la saison sèche pour un minimum ($0,06\text{mg/L}$) dans l'amont. Pour Affon, il est constaté qu'elle varie entre $1,37\text{mg/L} \pm 0,20$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($1,1\text{mg/L}$) dans la zone de reconstitution de prélèvement, contre $1,60\text{mg/L} \pm 0,10$ pendant la saison sèche dont le minimum ($0,46\text{mg/L}$) se retrouve dans l'amont. Enfin à la station de Adjiro, elle varie entre $0,52\text{mg/L} \pm 0,19$ pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum ($0,25\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $0,42\text{mg/L} \pm 0,11$ pendant la saison sèche dont le minimum ($0,21\text{mg/L}$) est dans la zone polluée. La figure 12 montre les variations moyennes de calcium pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

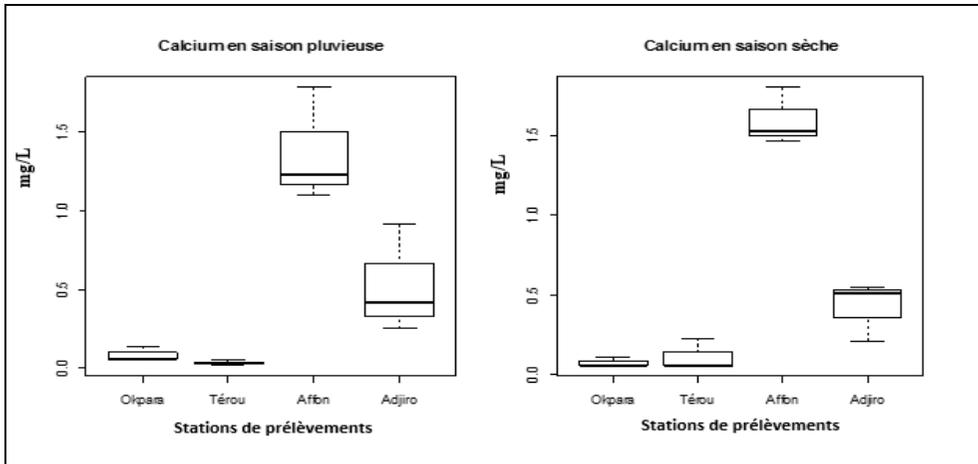


Figure 12. Variations moyennes des calciums en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.12. Magnésium

Le magnésium fait partir des éléments les plus répandus également dans la nature. La moyenne, varie entre $2,05\text{mg/L}\pm 0,20$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($1,7\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $2,17\text{mg/L}\pm 0,05$ dont le minimum ($2,2\text{mg/L}$) se trouve dans l'amont. A la station de Térrou, elle est à $1,42\text{mg/L}\pm 0,23$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($1,05\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $1,66\text{mg/L}\pm 0,09$ pendant la saison sèche pour un minimum ($1,47\text{mg/L}$) dans la zone de reconstitution. Pour Affon, il est constaté qu'elle varie entre $3,93\text{mg/L}\pm 0,96$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($2,3\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $1,53\text{mg/L}\pm 0,10$ pendant la saison sèche dont le minimum ($1,37\text{mg/L}$) se retrouve dans l'amont de prélèvement. Enfin à Adjiro, elle varie entre $1,36\text{mg/L}\pm 0,59$ pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum ($0,18\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $1,48\text{mg/L}\pm 0,45$ pendant la saison sèche dont le minimum ($0,58\text{mg/L}$) est dans la zone de reconstitution. La figure 13 montre les variations moyennes de magnésium pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

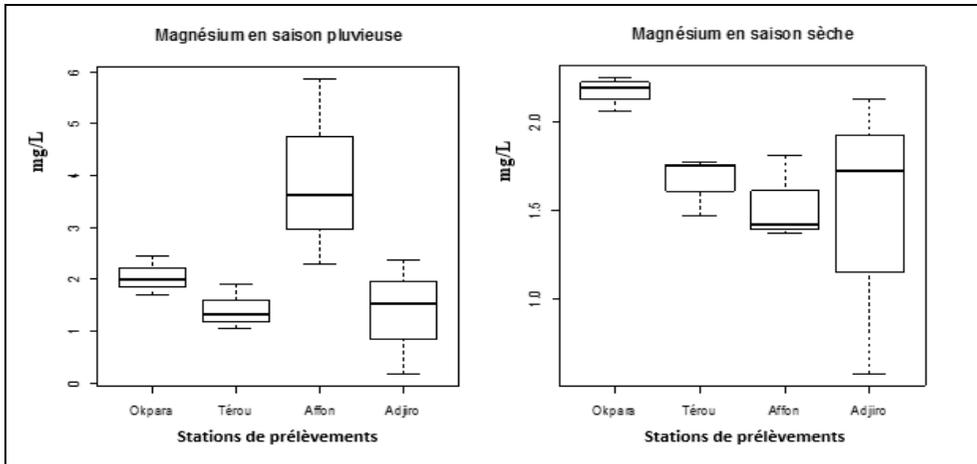


Figure 13. Variations moyennes de magnésium en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.13. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La moyenne, varie entre $55,43\text{mg/L} \pm 10,41$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($34,6\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, de même que pendant la saison sèche. A Térrou, elle est à $78,36\text{mg/L} \pm 24,1$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($30,1\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $52,33\text{mg/L} \pm 28,83$ pendant la saison sèche pour un minimum ($11,3\text{mg/L}$) dans l'amont. A Affon, il est constaté qu'elle varie entre $78,36\text{mg/L} \pm 24,13$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($30,1\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $52,33\text{mg/L} \pm 28,83$ pendant la saison sèche dont minimum (11mg/L) se retrouve dans la zone de reconstitution de prélèvement. Enfin à Adjro, elle varie entre $78,36\text{mg/L} \pm 24,13$ pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum ($30,1\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $48,7\text{mg/L} \pm 5,25$ pendant la saison sèche dont le minimum ($40,5\text{mg/L}$) est dans la zone polluée. La figure 14 montre les variations moyennes des demandes chimiques en oxygènes pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

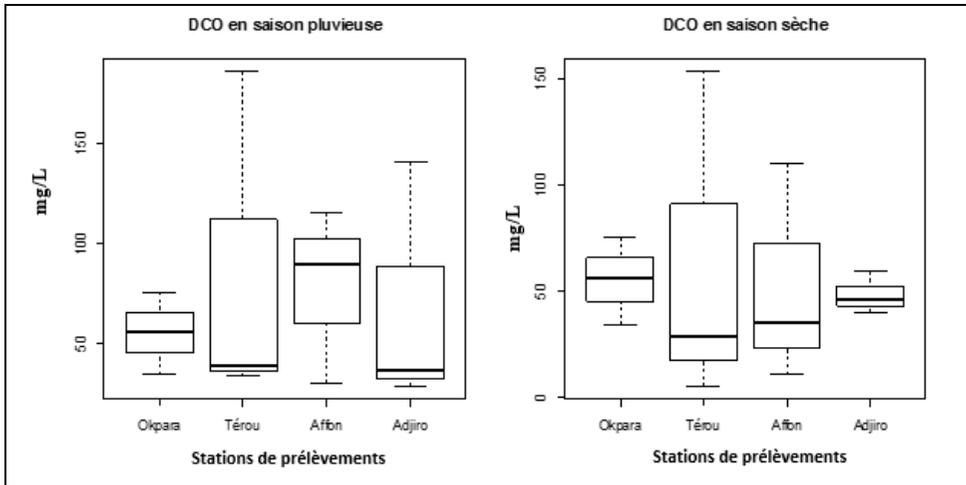


Figure 14. Variations moyennes de la demande chimique en oxygènes en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.14. Fer

Il est une composante essentielle des cycles biogéochimiques. Moyennement, elle varie entre $0,52\text{mg/L} \pm 0,17$ à la station Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,33\text{mg/L}$) se trouvant dans la zone de reconstitution de prélèvement, contre $0,48\text{mg/L} \pm 0,18$ pendant la saison sèche ayant un minimum ($0,23\text{mg/L}$) dans la zone de reconstitution. A Térou, elle est à $0,28\text{mg/L} \pm 0,05$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,19\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $0,21\text{mg/L} \pm 0,06$ pendant la saison sèche pour un minimum ($0,10\text{mg/L}$) dans la zone polluée. A Affon, il est constaté qu'elle varie entre $0,38\text{mg/L} \pm 0,04$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,31\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $0,19\text{mg/L} \pm 0,04$ dans la saison sèche dont le minimum ($0,11\text{mg/L}$) se retrouve dans l'amont. Enfin Adjiro, elle varie entre $0,35\text{mg/L} \pm 0,07$ dans la saison pluvieuse ayant pour minimum ($0,20\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $0,36\text{mg/L} \pm 0,09$ pendant la saison sèche dont le minimum ($0,20\text{mg/L}$) est dans l'amont. La figure 15 montre les variations moyennes de fer pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

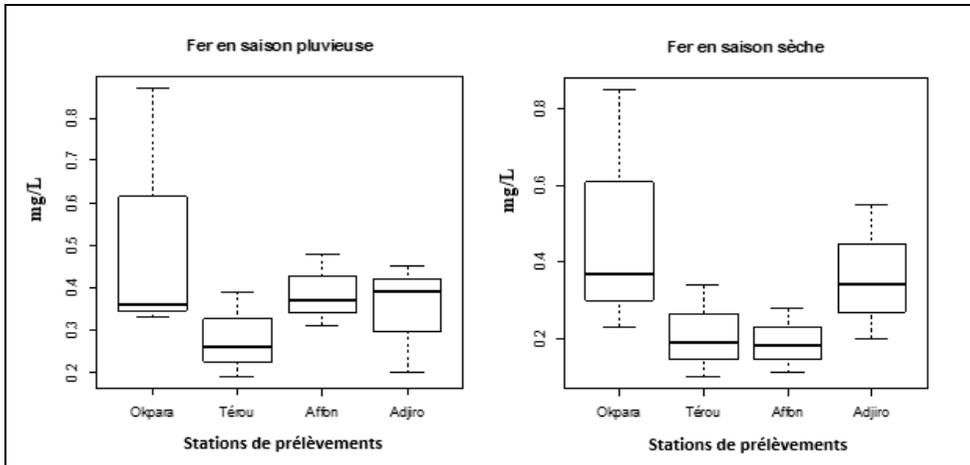


Figure 15. Variations moyennes de fer en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.1.15. Chlorure

La Moyenne varie entre $3,66\text{mg/L} \pm 1,27$ à la station de l'Okpara pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($2,4\text{mg/L}$) se trouvant dans l'amont de prélèvement, contre $3,80\text{mg/L} \pm 0,80$ pendant la saison sèche ayant un minimum ($2,20\text{mg/L}$) dans l'amont. A la station de Térou, elle est à $6,80\text{mg/L} \pm 1,35$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($4,70\text{mg/L}$) se trouvant dans la zone polluée de prélèvement, ce qui en est de même pendant la période de décrue. Pour Affon, il est constaté qu'elle varie entre $0,29\text{mg/L} \pm 0,03$ pendant la saison pluvieuse avec un minimum ($0,23\text{mg/L}$) dans l'amont de prélèvement, contre $0,50\text{mg/L} \pm 0,10$ pendant la saison sèche dont le minimum ($0,3\text{mg/L}$) se retrouve dans l'amont. Enfin à Adjro, elle varie entre $6,80\text{mg/L} \pm 1,35$ pendant la saison pluvieuse ayant pour minimum ($4,70\text{mg/L}$) dans la zone polluée de prélèvement, contre $14,56\text{mg/L} \pm 1,73$ pendant la saison sèche dont le minimum ($11,1\text{mg/L}$) se retrouve dans l'amont. La figure 16 montre les variations moyennes de chlorure pendant la saison pluvieuse et la saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur.

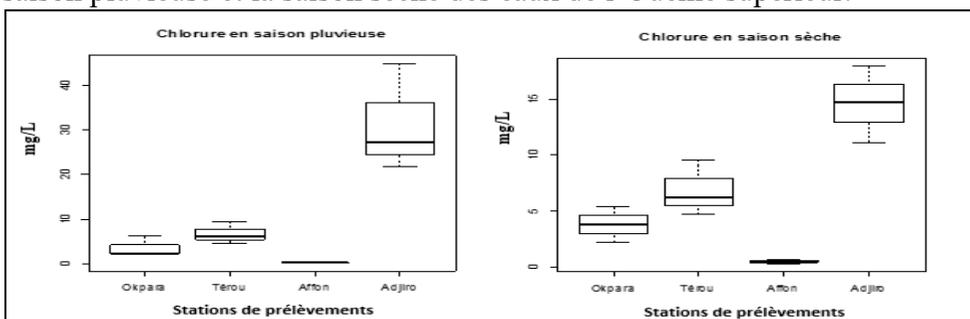


Figure 16. Variations moyennes de chlorure en saison pluvieuse et saison sèche des eaux de l'Ouémé supérieur de 2021-2022

3.2. Caractérisation de niveau de pollution des eaux des stations pendant la saison pluvieuse

Une comparaison des eaux des stations étudiées est effectuée par le test de Kruskal-Wallis. Sur ce, une condition d'application du test est vérifiée avec le test de Shapiro-Wilk sur les quinze (15) paramètres évalués. Il ressort, que les variations se traduisent par des distributions anormales avec le test de Shapiro-Wilk, à un seuil $\alpha = 5\%$ sur les stations de l'Okpara, Térrou, Affon et Adjiro pour les températures, le potentiel d'hydrogène, la conductivité électrique, les solides totaux dissous, l'oxygène dissous, le nitrate, le nitrite, l'ammonium, le phosphate, le calcium, le magnésium, la demande chimique en oxygène, le fer et le chlorure. Sauf, pour la salinité (p-value = 0,000) à Okpara, Affon, Adjiro et p-value = $2,2e^{-16}$ à Térrou d'une part. D'autre part, le nitrate (p-value = $2,2e^{-16}$) à Okpara et Térrou, le nitrite (p-value = $2,2e^{-16}$) à Adjiro, le calcium et le chlorure ont une p-value = $2,2e^{-16}$ à Okpara. Aucun des paramètres ne présente une distribution normale. Le critère de Shapiro-Wilk étant ainsi observé à 85% des groupes, nous avons poursuivi la comparaison avec le test de Kruskal-Wallis. Nous constatons que les différences relevées des concentrations obtenues avec l'analyse des box plot, n'est pas statistiquement significative au seuil de 5%. En particulier pour les paramètres des eaux tels que la température (p-value = 0,281), le potentiel d'hydrogène (p-value = 0,120), l'oxygène dissous (p-value = 0,269), le nitrate (p-value = 0,627), le nitrite (p-value = 0,610), le phosphate (p-value = 0,218), le magnésium (p-value = 0,103), la demande chimique en oxygène (p-value = 0,963) et le fer (p-value = 0,623) s'équivalent. Cependant, les statistiques de $H = 3,821$; $H = 5,820$; $H = 9,974$; $H = 8,128$; $H = 3,923$; $H = 8,485$; $H = 1,741$; $H = 1,82$; $H = 9,491$; $H = 4,428$; $H = 10,421$; $H = 6,179$; $H = 1,762$; $H = 9,876$; indiquent respectivement pour la température, le potentiel d'hydrogène, la conductivité électrique, les solides totaux dissous, l'oxygène dissous, la salinité, le nitrate, le nitrite, l'ammonium, le phosphate, le calcium, le magnésium, le fer et le chlorure; des différences probables entre les stations. Ainsi, bien que la significativité de cette différence ne soit pas forte à 5%; tous ces paramètres peuvent être déterminants dans la recherche d'une quelconque influence sur la qualité des eaux de surfaces pendant la saison pluvieuse.

Tableau 3. Test statistique de normalité et de comparaison des eaux des stations (*p-value) en saison pluvieuse

BV	Paramètres	Shapiro-Wilk (Normalité à $\alpha=0,05$)				Kruskal-Wallis	
		Okpara	Térou	Affon	Adjiro		
Bassin versant de l'Ouémé supérieur	Température (°C)	0,392	0,888	0,997	0,997	3,821	0,281*
		0,947*	0,350*		0,899*		
	Potentiel d'hydrogène	0,813	0,918	0,903	0,923	5,820	0,120*
		0,146*	0,448*		0,463*		
	Conductivité Electrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,964	0,923	0,859	0,957	9,974	0,018*
		0,636*	0,465*		0,602*		
	Solide Totaux Dissous (mg/L)	0,995	0,870	0,827	0,964	8,128	0,043**
		0,867*	0,298*		0,635*		
	Oxygène Dissous (mg/L)	0,988	0,979	0,888	0,877	3,923	0,269*
		0,796*	0,726*		0,317*		
	Salinité (‰)	0,000	0,75	0,000	0,000	8,485	0,036 **
		0,000***	16***	2,2e ⁻	0,000***		
	Nitrate (mg/L)	0,75	0,75	0,964	0,909	1,741	0,627*
		16***	2,2e ⁻	16***	0,636*	0,417*	
Nitrite (mg/L)	0,999	0,870	0,964	0,75	1,82	0,610*	
	0,966*	0,298*		16***	2,2e ⁻		
Ammonium (mg/L)	0,923	0,994	0,000	0,925	9,491	0,023**	

	0,463*	0,852*	0,000***	0,472*			
Phosphate (mg/L)	0,753	0,952	0,799	0,112*	0,840	4,428	0,218*
	0,008**	0,578*			0,216*		
Calcium (mg/L)	0,75	0,964	0,887	0,345*	0,918	10,42	0,015**
	¹⁶ ***	0,636*			0,447*		
Magnésium (mg/L)	0,986	0,957	0,978	0,071*	0,983	6,179	0,103*
	0,780*	0,603*			0,750*		
Demande Chimique en Oxygène (mg/L)	0,998	0,773	0,946	0,555*	0,798	0,282	0,963*
	0,929*	0,053*			0,111*		
Fer (mg/L)	0,791	0,970	0,971	0,678*	0,917	1,762	0,623*
	0,094*	0,672*			0,443*		
Chlorure (mg/L)	0,75	0,955	0,975	0,701*	0,918	9,876	0,019**
	¹⁶ ***	0,592*			0,447*		

Légende : * = p-value ; ** = p-value < 0,05 (moyenne significativité) ; *** = p-value < 0,001 (forte significativité)

3.3. Caractérisation de niveau de pollution des eaux des stations étudiées pendant la saison sèche

Dans le même contexte, en rapport à la caractérisation de niveau de pollution des eaux des stations pendant la saison sèche ; la comparaison est effectuée par le test de Kruskal-Wallis. Alors, la condition d'application du test est également vérifiée avec le test de Shapiro-Wilk sur les quinze (15) paramètres faisant l'objet de l'étude. Les variations se traduisent également par des distributions anormales avec le test de Shapiro-Wilk, à un seuil $\alpha = 5\%$ sur Okpara, Térou, Affon et Adjiro dans presque tous les paramètres évalués. Il est excepté d'une part, pour la salinité à Okpara, Affon, Adjiro pour une p-value = 0,000 et une p-value = $2,2e^{-16}$ à Térou. De même, le nitrite fait l'exception dans les eaux de l'Okpara pour une p-value = 0,000 et une p-value = $2,2e^{-16}$ respectivement dans les eaux de Térou, Affon et Adjiro. Ensuite, la température à Okpara pour une p-value = $2,2e^{-16}$, le nitrate à Okpara et Térou ont respectivement une p-value = 0,000 et p-value = $2,2e^{-16}$; l'ammonium (p-value = 0,000) à Affon et le calcium (p-value = $2,2e^{-16}$) respectivement à Okpara et Térou. Egalement, aucun des paramètres ne présente une distribution normale pour cette période représentant la saison sèche. Le critère de Shapiro-Wilk étant ainsi observé à 77% des groupes, nous avons poursuivi également la comparaison avec le test de Kruskal-Wallis. Les différences relevées des concentrations obtenues avec l'analyse des box plot, n'est pas statistiquement significative au seuil de 5%. En particulier pour le potentiel d'hydrogène (p-value = 0,061), le nitrite (p-value = 0,060), le phosphate (p-value = 0,094), le magnésium (p-value = 0,134), la demande chimique en oxygène (p-value = 0,887) et le fer (p-value = 0,181) des eaux s'équivalent tous. Cependant, les statistiques de $H = 10,009$; $H = 7,359$; $H = 9,666$; $H = 9,666$; $H = 8,743$; $H = 8,485$; $H = 8,256$; $H = 7,394$; $H = 8,555$; $H = 6,384$; $H = 9,060$; $H = 5,564$; $H = 4,876$; $H = 9,974$; indiquent respectivement pour la température, le potentiel d'hydrogène, la conductivité électrique, les solides totaux dissous, l'oxygène dissous, la salinité, le nitrate, le nitrite, l'ammonium, le phosphate, le calcium, le magnésium, le fer et le chlorure ont des différences probables entre les stations.

Tableau 4. Test statistique de normalité et de comparaison des eaux des stations (*p-value) en saison sèche

BV	Paramètres	Shapiro-Wilk (Normalité à $\alpha=0,05$)				Kruskal-Wallis				
		Okpara	Térou	Affon	Adjiro					
Bassin versant de l'Ouémé supérieur	Température (°C)	0,75 16***	2,2e ⁻ 0,842*	0,993 0,986	0,964 1	0,932 0,820	10,009 7,359	0,497* 0,165*	0,018** 0,061*	
	Potentiel d'hydrogène	0,964	0,636*	0,780*	0,903	0,942	9,666	0,536*	0,021**	
	Conductivité Electrique (µS/cm)	0,926	0,474*	0,994	0,903	0,942	9,666	0,536*	0,021**	
	Solide Totaux Dissous (mg/L)	0,926	0,475*	0,994	0,904	0,947	9,666	0,557*	0,021**	
	Oxygène Dissous (mg/L)	0,986	0,780*	0,863* 0,864*	0,397* 0,399*	0,891	0,792	8,743	0,096*	0,032**
	Salinité (‰)	0,000	0,000***	0,75 16***	2,2e ⁻	0,000 0,000***	0,000	8,485	0,000***	0,036**
	Nitrate (mg/L)	0,75 16***	2,2e ⁻	0,75 16***	2,2e ⁻	0,923 0,463*	1	8,256	1*	0,041**
	Nitrite (mg/L)	0,000 0,000***		0,75 16***	2,2e ⁻	0,75 16***	0,75 16***	7,394	2,2e ⁻	0,060*
	Ammonium (mg/L)	0,923		0,999	0,000	0,812	8,555		0,035**	

	0,463*		0,952*		0,000***		0,1436*	
Phosphate (mg/L)	0,814		0,944		1		0,776	6,384
	0,150*		0,546*		1*		0,0601*	0,094*
Calcium (mg/L)	0,75	2,2e ⁻	0,75	2,2e ⁻	0,896		0,836	9,060
	16***		16***		0,374*		0,205*	0,028**
Magnésium (mg/L)	0,930		0,799		0,834		0,927	5,564
	0,490*		0,113*			0,198*	0,479*	0,134*
Demande Chimique en Oxygène (mg/L)	0,998	0,929*	0,782		0,921		0,956	0,641
			0,072*			0,457*	0,599*	0,887*
Fer (mg/L)	0,909	0,414*	0,979		0,989		0,986	4,876
			0,726*			0,806*	0,780*	0,181*
Chlorure (mg/L)	1		0,955		1		0,998	9,974
	1*		0,592*			1*	0,935*	0,018**

Légende : * = p-value ; ** = p-value < 0,05 (moyenne significativité) ; *** = p-value < 0,001 (forte significativité)

3.4. Analyse quantitative des données hydrochimiques

Plusieurs techniques sont adoptées dans le classement des différents paramètres physico-chimiques des eaux par des groupes hydrochimiques distincts (Belhadj et al., 2017). Afin de classer les différents paramètres physico-chimiques, une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a été réalisée avec le logiciel R version 4.0.0. Le tableau ci-dessous montre les différents groupes suivant les paramètres étudiés

Tableau 5. Groupes hydrochimiques des paramètres physico-chimiques étudiés

Paramètres	Groupes
°C	2
pH	1
CE	3
STD	2
OD	1
Salinité	1
NO₂⁻	1
NO₃⁻	1
NH₄⁺	1
PO₄³⁻	1
Ca²⁺	1
Mg²⁺	1
DCO	2
Fer	1
Cl⁻	1

Partant des différentes données collectées (saison pluvieuse et saison sèche), il a été constaté qu'il n'y a pas de distinction dans les différents groupes selon les variables hydrochimiques pour les deux périodes. Ainsi, trois groupes ont été obtenus dont :

- Le groupe 1, constitué de : pH, OD, salinité, NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ et le Cl⁻ ; proviennent principalement des activités agricoles et des eaux usées.

- Le groupe 2, constitué de : °C, STD et la DCO ; proviennent des différents éléments chimiques solubles dans l'eau. En effet, ces paramètres provoquent la disparition de certaines espèces et la croissance accélérée des végétaux.

- Le groupe 3, constitué de : CE, provient de la minéralisation globale de l'eau. La conductivité électrique très élevée est une grande indicatrice de conditions salines.

La figure ci-dessous montre la classification ascendante hiérarchisée des groupes hydro-chimiques des variables physico-chimiques.

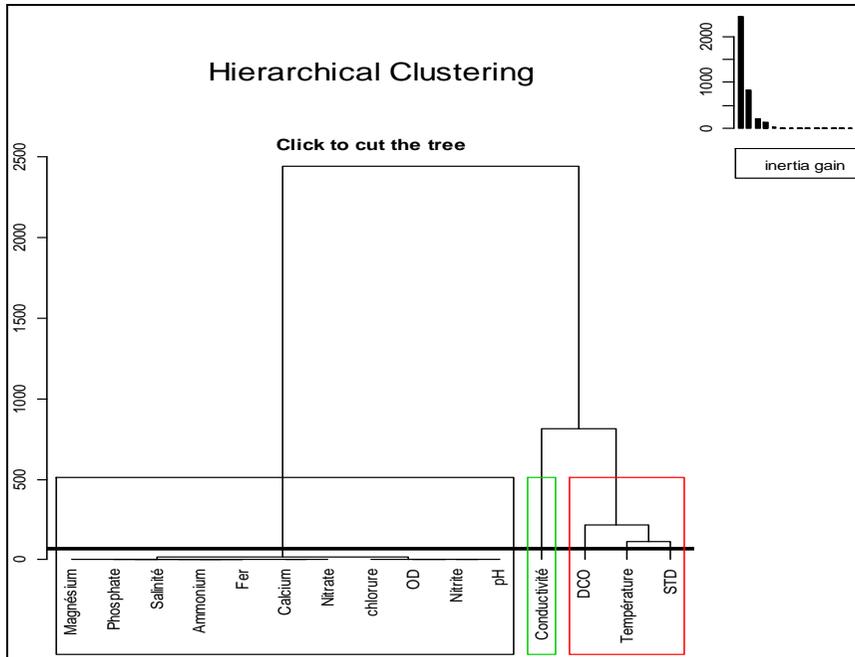


Figure 17. Classification ascendante des groupes hydrochimiques des variables physico-chimiques des eaux de l’Ouémé supérieur de 2021-2022

4. Discussion

Les paramètres physico-chimiques ayant fait l’objet de la présente recherche, ont servi à l’appréciation de la qualité des eaux de l’Ouémé supérieur au Bénin. Des variations spatio-temporelles ont été observées de l’amont à la zone polluée et dans la zone de reconstitution.

4.1. Qualité physique des eaux de l’Ouémé supérieur au Bénin

Les valeurs élevées observées pour les mesures de la température sont comprises entre $25,5^{\circ}\text{C} \leq \text{C} \leq 34,7^{\circ}\text{C}$; qui peuvent être expliquées par l’effet des variations saisonnières le long du fleuve. Ces valeurs ne respectent pas les normes recommandées par l’OMS ($\sim 25^{\circ}\text{C}$) et le MPS ($\sim 25^{\circ}\text{C}$). Cette explication fait référence aux études de Lanmandjekpogni et al., (2019) dans la pollution des eaux de surface par les éléments nutritifs et de Orou et al., (2016) sur la variation saisonnière de la qualité Physico-chimique des eaux souterraines ; montrant une grande augmentation de la température. Les potentiels d’hydrogènes observées, dont les valeurs sont comprises entre $5,4 \leq \text{pH} \leq 7,89$ sont conformes aux normes recommandées par l’OMS ($6,5 < \text{pH} < 9,5$) et le MPS ($6 < \text{pH} < 9$) pour les eaux de surfaces. Les résultats sont semblables à ceux de Koudenoukpo et al., (2017) sur la caractérisation physico-chimique d’un système lotique en région tropicale et de Adjagodo et al., (2017) dans la pollution physique et bactériologique de l’eau du fleuve

dans la basse vallée de l'Ouémé pendant les périodes de basses et hautes eaux au Bénin. Les valeurs relatives aux conductivités électriques sont comprises entre $9,36\mu\text{S}/\text{cm} \leq \text{CE} \leq 834\mu\text{S}/\text{cm}$; son au-dessous des normes exigées par l'OMS ($< 1500\mu\text{S}/\text{cm}$) et MPS ($2000\mu\text{S}/\text{cm}$). Distinctement, les eaux du bassin de l'Ouémé supérieur sont faiblement ionisées. Relativement aux solides totaux dissous, dont les valeurs sont comprises entre $5,8\text{mg}/\text{L} \leq \text{STD} \leq 773,9\text{mg}/\text{L}$ ce qui respectent les normes recommandées par l'OMS (< 600) et de MPS ($< 2000\text{mg}/\text{L}$). Cette explication fait également référence aux travaux de Chouti et al., (2017) sur la caractérisation physico-chimique et étude de la toxicité de la lagune côtière, de Togbin à Grand-Popo.

4.2. Qualité chimique des eaux de l'Ouémé supérieur au Bénin

Les différentes valeurs obtenues au niveau de l'oxygène dissous varient entre $2,47\text{mg}/\text{L} \leq \text{OD} \leq 6,87\text{mg}/\text{L}$; ces valeurs ne respectent pas les normes de l'OMS ($5 \leq \text{OD} \leq 8$) et de MPS (≥ 8). Ces résultats sont semblables aux travaux de Adjagodo et al., (2017) dans la pollution physique et bactériologique de l'eau du fleuve dans la basse vallée de l'Ouémé pendant les périodes de basses et hautes eaux au Bénin et de Dimane et al., (2017) sur l'impact des facteurs de pollution sur la qualité des eaux de la vallée de l'oued Nekor. Les valeurs obtenues relativement pour la salinité des eaux du bassin de l'Ouémé supérieur varient entre $0 \leq \text{sal} \leq 0,1$; ce qui n'est pas conformes aux normes exigées par l'OMS et du Ministère de la Santé Publique du Bénin pour une eau exploitable. Les résultats obtenus sont conformes aux travaux de recherche de Koudenoukpo et al., (2017) sur la caractérisation physico-chimique d'un système lotique en région tropicale.

Le nitrate, le nitrite et l'ammonium dans les eaux de l'Ouémé supérieur ont respectivement des valeurs comprises entre $0,3\text{mg}/\text{L} \leq \text{NO}_3^- \leq 7,3\text{mg}/\text{L}$; $3,7\text{mg}/\text{L} \leq \text{NO}_2^- \leq 7\text{mg}/\text{L}$ et $0,03\text{mg}/\text{L} \leq \text{NH}_4^+ \leq 0,97\text{mg}/\text{L}$ ce qui ne respectent pas les normes recommandées et exigées par l'OMS et du Ministère de la Santé Publique du Bénin pour une de surface exploitable. L'OMS recommande respectivement des valeurs : $< 50\text{mg}/\text{L}$; $< 0,1\text{mg}/\text{L}$ et $0\text{mg}/\text{L}$ pour le nitrate, le nitrite et l'ammonium. De même, au niveau du Ministère de la Santé Publique du Bénin (MSP), ces valeurs sont respectivement : $45\text{mg}/\text{L}$; $3,2\text{mg}/\text{L}$ et $0,5\text{mg}/\text{L}$. Il urge de souligner, dans les eaux de l'Ouémé supérieur au Bénin, que le nitrate est moins représenté au détriment du nitrite et de l'ammonium suivant les normes recommandées. Les résultats obtenus dans cette étude sont semblables aux travaux de Adjagodo et al., (2017) dans la pollution physique et bactériologique de l'eau du fleuve dans la basse vallée de l'Ouémé pendant les périodes de basses et hautes eaux au Bénin et de Carine et al., (2018) sur la qualité de l'eau potable de Manta en république du Bénin. Les valeurs du phosphate sont comprises entre $0,001\text{mg}/\text{L} \leq \text{PO}_4^{3-} \leq 0,97\text{mg}/\text{L}$, elles ne respectent pas les

normes exigées par l'OMS (2mg/L) et le Ministère de la Santé Publique du Bénin (1mg/L) pour les eaux de surface dans les périodes de crue et de décrue. Les résultats obtenus sont similaires à celui de Inza et al., (2009) dans la caractérisation physico-chimique des eaux et des sédiments de surface de la baie des milliardaires et de Kouassi et al., (2015) à l'approvisionnement en eau potable, qualité de la ressource et risques sanitaires associés à Korhogo. Les valeurs de la demande chimique en oxygène (DCO) varient entre $5,81\text{mg/L} \leq \text{DCO} \leq 185,72\text{mg/L}$; ces valeurs ne respectent pas les normes de recommandation pour une de surface à 90mg/L pour l'OMS et 125mg/L pour le Ministère de la Santé Publique (MSP).

Le calcium, le magnésium, le chlorure et le fer, ont respectivement des valeurs comprises entre $0,02\text{mg/L} \leq \text{Ca}^{2+} \leq 1,80\text{mg/L}$; $0,18\text{mg/L} \leq \text{Mg}^{2+} \leq 5,86\text{mg/L}$; $0,1\text{mg/L} \leq \text{Fe}^{2+} \leq 0,87\text{mg/L}$; $0,23\text{mg/L} \leq \text{Cl}^- \leq 44,8\text{mg/L}$. À priori, le calcium ; le magnésium ; le fer et le chlorure respectent les normes exigées par l'OMS et du Ministère de la Santé Publique du Bénin. Pour l'OMS, les normes exigées sont respectivement : 200mg/L pour le calcium ; 150mg/L pour le magnésium ; pas une valeur référencée pour le fer et le chlorure ($\leq 250\text{mg/L}$). En se penchant étroitement, sur les normes du Ministère de la Santé Publique (MSP) ; les recommandations sont : 100mg/L pour le calcium ; 50mg/L pour le magnésium ; $0,3\text{mg/L}$ pour le fer et 250mg/L pour le chlorure. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de (Moussa et al., 2018) pour une étude comparative de la qualité physico-chimique des eaux d'aquifère de la Korama de la région de Zinder (Niger) pendant la saison pluvieuse et la saison sèche. Ces résultats sont également similaires aux travaux de recherche de Miriac et al., (2020) dans les eaux de consommation et maladies hydriques dans la commune de Lokossa au sud-ouest de la république du Bénin.

Conclusion

Au terme de la présente étude, les eaux de l'Ouémé supérieur ont une tendance vers une dégradation. L'évaluation des paramètres physico-chimiques montre l'évolution de la pollution de l'amont vers la zone polluée selon le gradient de l'écoulement des eaux. Elle indique l'influence des activités agricoles sur les eaux du fleuve et présente les stations situées en aval comme les plus perturbées. Les concentrations au-dessus des normes régies, témoignent des risques élevés de pollution. Nos résultats montrent les risques très importants de pollution par les fertilisants dans ce contexte. Ils confirment la nécessité de traitement des eaux en cas de prévision de pluie à long terme. Vue ce constat, le travail permettra d'aider les services techniques du gouvernement dans les choix d'orientation et de gestion

prévisionnelle des ressources en eau au Bénin et le choix des intrants agricoles.

References:

1. Abahi, K.S., Gnohossou, P., Akodogbo, H.H., Orou Piami, Z., Adje, D., Tchaou, C., & Okoya, J. (2018). Structure et diversité des macroinvertébrés benthiques de la partie supérieure du fleuve Ouémé au Bénin. *Afr. Sci. Rev. Int. Sci. Technol*, 14, 259–270.
2. Adjagodo, A., Kelomè, N. C., Vissin, E. W., & Agbossou, E. (2017). Pollution Physique Et Bactériologique De L'eau Du Fleuve Dans La Basse Vallée De L'ouémé Pendant Les Périodes De Basses Et Hautes Eaux Au Bénin. *European Scientific Journal*, 13(33), 167-186.
3. Adjagodo, A., Tchibozo, M. A. D., Kelome, N. C., & Lawani, R. (2016). Flux des polluants liés aux activités anthropiques, risques sur les ressources en eau de surface et la chaîne trophique à travers le monde : Synthèse bibliographique. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(3), 1459-1472.
4. Belhadj, M. Z., Boudoukha, A., Amroune, A., Gaadai, A., & Ziani, D. (2017). Caractérisation statistique de la qualité des eaux souterraines de la région nord du bassin du Hodna, M'sila. *Sud-Est Algérien. Larhyss Journal*, 177-194.
5. Carine, K. N., Waris, C., Niréti, L. R. A., & Pélagie, O. (2018). Quality of Drinking Water in the Town of Manta in Benin Republic. *European Scientific Journal*, 14(2), 188p.
6. Chouti, W. K., Chitou, N. E., Kelome, N., Kpako, B. B. H., Vlavanou, D. H., & Tossou, M. (2017). Caractérisation Physico-Chimique Et Étude De La Toxicité De La Lagune Côtière, De Togbin À Grand Popo (Sud-Ouest Bénin). *European Scientific Journal*, 13(27), 131-151.
7. Coffi, S. M., Yalo, N., Ahamide, B., & Mama, D. (2020). Étude de la dégradation de la concentration en chlore résiduel libre dans les eaux de boisson au Bénin : Cas de la commune de Cotonou. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 14(9), 3372-3390.
8. Diallo, M. D., Ndiaye, O., Saleh, M. M., Tine, A., Diop, A., & Guisse, A. (2015). Étude comparative de la salinité de l'eau et des sols dans la zone nord des Niayes (Sénégal). *African Crop Science Journal*, 23(2), 101-111.
9. Dimane, F., Haboubi, K., Hanafi, I., El Himri, A., & Andaloussi, K. (2017). Impact des facteurs de pollution sur la qualité des eaux de la zone aval de la vallée de l'Oued Nekor (Al-Hoceima, Maroc). *European Scientific Journal*, 13(3), 43.

10. Dovonou, F., Aina, M., Boukari, M., & Alassane, A. (2011). Pollution physico-chimique et bactériologique d'un écosystème aquatique et ses risques écotoxicologiques : Cas du lac Nokoué au Sud Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(4), 1590-1602.
11. Hounkpe J., Kelome N., Lawani R., & Adechina A. (2017). Status of aquatic ecosystem pollution in Benin (West Africa). *LARHYSS Journal*, 30, 149-171.
12. Inza, B., Soro, M., Etchian, A., Trokourey, A., & Bokra, Y. (2009). Caractérisation physico-chimique des eaux et des sédiments de surface de la baie des milliardaires, lagune Ebrié, Côte d'Ivoire. *Rev Ivoir Sci Technol*, 13, 139-154.
13. Kouassi, R. M., Koné, B., Yao, E. K., Silué, B., Cissé, G., & Soro, N. (2015) *Approvisionnement en eau potable, qualité de la ressource et risques sanitaires associés à Korhogo (Nord-Côte d'Ivoire)*. *Environnement, risques & santé*, 14 (3), 230-241.
14. Koudenoukpo, Z. C., Chikou, A., Adandedjan, D., Hazoume, R., Youssao, I., Mensah, G. A., & Laleye, A. P. (2017). Caractérisation physico-chimique d'un système lotique en région tropicale: La rivière Sô au Sud-Bénin, Afrique de l'Ouest. *Journal of Applied Biosciences*, 113(1), 11111-11122.
15. Kougblenou, C., Azonbakin, S., Accrombessi, M., Aguemon, B., Adjagba, M., Awede, B., Aina, M. P., Darboux, R. B., & Laleye, A. (2018). Evaluation du risque de génotoxicité de l'eau de la rivière Okpara à Kika au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(3), 1298-1308.
16. Kpidi, Y. H., Yapou, O. B., Ballet, T. G., & Ohou-Yao, M.-J. (2017). Variabilité journalière de la qualité physico-chimique du lac M'koa de Jacquville (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(2), 901-910.
17. Lanmandjekpogni, M. P., de Paule Codo, F., & Yao, B. K. (2019). Pollution des eaux de surface par les éléments nutritifs et lien avec l'urbanisation à l'échelle des bassins versants de l'Okpara à Parakou (Bénin). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 27(1), 33-42.
18. Lawani, A. N., Kelome, N. C., Tchibozo, M. A. D., Hounkpe, J. B., & Adjagodo, A. (2017). Effects of agricultural practices on the pollution of surface water in Benin Republic. *LARHYSS Journal*, 30, 173-190.
19. Miriac, A. S. D., Noukpo, A., & Christophe, H. S. (2020). Eau De Consommation Et Maladies Hydriques Dans La Commune De

- Lokossa Au Sud-Ouest De La République Du Benin (Afrique De L'ouest). *European Scientific Journal*, (15), 393-4017.
20. Moussa, R. S., Alma, M. M. M., Laouali, M. S., Natatou, I., & Habou, I. (2018). Étude comparative de la qualité physico-chimique des eaux d'aquifère de la Korama (Korama superficielle et Korama profonde) de la région de Zinder (Niger) pendant la saison pluvieuse et la saison sèche. *Afrique SCIENCE*, 14(6), 203-215.
 21. Orou, R. K., Soro, G., Soro, D. T., Fossou, R. M. N., Onetie, O. Z., Ahoussi, E. K., & Soro, N. (2016). Variation saisonnière de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des aquifères d'altérites d'u département d'Agboville (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 12(17), 213p.
 22. PANA. (2007). Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques du Benin (PANA-Bénin).
 23. Sokegbe, O. Y., Djeri, B., Kogno, E., Kangnidossou, M., Mensah, R. T., Soncy, K., & Ameyapoh, Y. (2017). Les risques sanitaires liés aux sources d'eau de boisson dans le district n° 2 de Lomé-commune : Cas du quartier d'Adakpamé. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(5), 2341-2351.
 24. Talhaoui, A., El Hmaidi, A., Jaddi, H., Ousmana, H., & Manssouri, I. (2020). Calcul De L'indice De Qualité De L'eau (IQE) Pour L'évaluation De La Qualité Physico-Chimique Des Eaux Superficielles De L'Oued Moulouya (NE, Maroc). *European Scientific Journal* , 16(2), 64p.