

EPURATION DES EAUX USEES PAR LAGUNAGE A MICROPHYTES EN AFRIQUE TROPICALE: CAS DE LA STATION DE TRAITEMENT DE ZONGO-ZENON A PARAKOU (NORD-BENIN)

[REFINING LIQUID WASTE BY MICROPHYTES LAGOONING IN TROPICAL AFRICA: CASE OF THE REFINING STATION OF ZONGO-ZÉNON IN PARAKOU (NORTHERN BENIN)]

Abdoul-Ramane ABDOULAYE¹, Y. M. A. Ramanou ABOUDOU¹, Isidore YOLOU¹, and Salifou KPERA ZIME²

¹Département de Géographie et Aménagement du Territoire,
Université de Parakou, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines,
Parakou, Bénin

²Direction des Services Techniques,
Mairie de Parakou,
Parakou, Bénin

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: A study based on liquid waste refining has been carried out on a three-basin channel (one anaerobic, one optional, and one of maturation) of microphytes lagooning at the liquid wastes refining station from the Arzèkè market in Parakou (Benin), from June to August 2014. Quality determining measurements have been used for ten weeks on samples collected following a daily frequency for some, and a weekly frequency for others. The average refining yields have reached 82.39% in MES, 86.04% in DBO5 and 86.18% in DCO. The MES supplemental concentrations of the refined effluent are positive in 50% of the used measurements following recommended rejection norms by the European Union directives (< 150 mg/l). Elimination of the phosphorus is low and unstable with a 19.75% in PO_4^{3-} average yield. Azotic pollution reduction has reached 53.98% in ammoniac azote, at times going beyond 75%. Globally, the Azote and phosphorus elimination is low, and the supplemental contents remain quite high compared to the accepted limit for an effluent rejection in a sensitive eutrophication ecosystem. Lowering the bacterial pollution is important, reaching 6.32 ulog in overall coliforms and 5.24 ulog for *Escherichia Coli*. But the supplemental contents (3, 71 ulog) remain higher than the WHO norm (< 3 ulog) for a non-restrictive re-use in irrigation. As for the salmonellas, studies have revealed that station adopt a partial refinement going from 40 to 50%.

KEYWORDS: Performance, channel, concentration, yield, effluent, lowering.

RESUME: Une étude portant sur l'épuration des eaux usées a été menée sur une filière de trois bassins (un anaérobie, un facultatif et un de maturation) de lagunage à microphytes à la station d'épuration des eaux usées du marché international de Parakou (Bénin) de juin à août 2014. Des mesures d'indicateurs de qualité ont été effectuées pendant 10 semaines sur des échantillons prélevés suivant une fréquence journalière pour certains et hebdomadaire pour d'autres. Les rendements épuratoires moyens atteignent 82,39% en MES, 86,04% en DBO5 et 86,18% en DCO. Les concentrations résiduelles en MES de l'effluent traité répondent dans 50% des mesures effectuées aux normes de rejet recommandées par la directive de l'Union Européenne (< 150 mg/l). L'élimination du phosphore est faible et instable avec un rendement moyen de 19,75% en PO_4^{3-} . La réduction de la pollution azotée atteint en moyenne 53,98% en azote ammoniacal, se chiffrant par moment au-dessus de 75%. De manière globale, l'élimination de l'azote et du phosphore est faible et les teneurs résiduelles restent assez

élevées par rapport à la limite tolérable pour un rejet d'effluent dans un écosystème sensible à l'eutrophisation. L'abattement de la pollution bactérienne est important allant jusqu'à 6,32 ulog en coliformes totaux et 5,24 ulog pour *Escherichia Coli*. Mais les teneurs résiduelles (3,71 ulog) restent tout de même supérieures à la norme OMS (< 3 ulog) pour une réutilisation non restrictive en irrigation. Concernant les salmonelles, les études ont montré que la station assure une élimination partielle allant de 40 à 50 %.

MOTS-CLEFS: Performance, filière, concentration, rendement, effluent, abattement.

1 INTRODUCTION

Nombreux sont les pays tropicaux, en particulier ceux du tiers monde qui ne bénéficient pas de stations d'épuration. Cependant ces pays ne peuvent plus évoluer sans que l'aspect assainissement soit pris en compte par les pouvoirs politiques. En effet, dans le souci de garantir une meilleure santé publique et de protéger l'environnement pour un développement durable, le besoin de promouvoir l'épuration des eaux usées domestiques et industrielles s'avère important et doit être pris en compte par les autorités administratives et politiques. Cependant le système qui serait le mieux adapté pour l'épuration des eaux usées dans ces pays tropicaux devrait prendre en compte les conditions climatique, sociale, politique et économique [1].

L'inadaptation des systèmes intensifs appliqués pour l'épuration des eaux usées dans certaines villes d'Afrique (boues activées) par rapport au niveau de technicité a constitué un handicap majeur dans de nombreux cas [2]. Diverses études sur des systèmes de traitement des eaux usées ont révélé que les technologies intensives qui représentaient 76% des stations construites en Afrique francophone en 1993, sont inadaptées dû à plusieurs facteurs comme le coût d'exploitation élevé, la non-disponibilité des pièces de rechange, le manque d'expérience et de la non-appropriation technologique du personnel en charge de la gestion de ces systèmes [3]. Le principal défi consiste à développer les options de traitement qui soient à la fois efficaces et techniquement adaptées aux conditions environnementales et financières des pays africains.

Selon [4], le procédé d'épuration par lagunage a vu le jour en Afrique de l'Ouest vers la fin des années 80 et connaît un intérêt grandissant auprès des décideurs politiques africains pour sa souplesse dans l'exploitation, la gestion et l'intégration dans ce contexte socio-économique. Selon le même auteur, au niveau expérimental, les procédés de lagunages montrent de bonnes perspectives d'implantation, mais aucune station n'a encore réellement fonctionné à grande échelle, pour des raisons d'ordre économique et d'un manque d'appui politique.

A l'instar de certains pays de l'Afrique francophone, le Bénin dispose de trois systèmes de traitements des eaux usées à savoir:

- le système intensif à boue activée du CNHU Hubert K. MAGA de Cotonou
- les systèmes extensifs d'EKPE, du Marché International ARZEKE de Parakou
- les systèmes extensifs de TAKON (Porto-Novo) et de Wanssirou-Gah (Parakou) non encore mise en service.

La station d'épuration des eaux usées du Marché International ARZEKE de Parakou, objet de la présente étude rencontre d'importants problèmes d'exploitation: faible production d'eau usée, colmatage de la conduite principale menant l'eau usée à la station de traitement entraînant de fréquentes nuisances olfactives, fréquentes casses au niveau des conduites drainant les eaux usées vers la station, manque d'entretien de la station entraînant un fort taux de boue dans le bassin anaérobie. C'est donc pour apporter notre contribution que la présente étude a été initiée afin d'optimiser le fonctionnement de cette station.

L'objectif de la présente étude est d'évaluer les performances épuratoires de la station d'épuration des eaux usées du Marché International Arzèkè de Parakou.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 MATÉRIEL

2.1.1 PRESENTATION GENERALE DU MILIEU D'ETUDE

La ville de Parakou est située entre 9°18 et 9°22 de latitude Nord et 2°33 et 2°37 de longitude Est [5]. Les données publiées [6] montrent que la population de la ville de Parakou a connu une augmentation spectaculaire. La population qui n'était que de 14 000 habitants en 1961 est passée à 60 000 et 103.577 respectivement en 1979 et 2002 pour plus de 254 254 habitants en 2013. Cette augmentation de la population entraîne forcément un accroissement des besoins et de la demande en denrées alimentaires frais. Les agriculteurs, attirés par le développement de la ville de Parakou à la recherche d'emplois plus rémunérateurs, trouvent à travers le maraîchage des opportunités pour assurer leur survie sur le plan économique.

2.1.2 DESCRIPTION DES CONDITIONS CLIMATIQUES

Dans un système lagunaire, le climat affecte, de façon directe, les processus biologiques qui s'y déroulent, et par conséquent, le rendement épuratoire des lagunes. A l'aide des données climatiques recueillies entre 2001 et 2014 par [7] pour la région de Parakou, nous pouvons étudier les principales conditions climatiques intervenant dans le bon fonctionnement du lagunage naturel, à savoir : la température, l'ensoleillement, la pluviométrie et l'évaporation. Le climat de la commune de Parakou est de type soudano-Sahélien avec deux saisons : une saison pluvieuse s'étendant d'Avril à Octobre et une saison sèche allant de mi-octobre à mi-avril. Elle est caractérisée par une humidité maximale annuelle qui est de 97% et enregistrée dans le mois de septembre alors que l'humidité minimale est de 20% et enregistrée entre janvier –février. La température annuelle maximale est de 36,7 °C dans le mois de mars et la température minimale annuelle est de 18,5°C dans le mois de décembre. L'évaporation annuelle maximale est de 245,5 mm en mars et l'évaporation minimale est de 103,3 mm en août. La hauteur d'eau annuellement enregistrée varie entre 1.000 mm et 1.500mm pour 75 à 140 jours effectifs de pluie.

2.1.3 PRESENTATION DE LA STATION D'EPURATION

Créée en 1996 avec le concours de la Caisse Française de Développement (CFD), la station d'épuration des eaux usées de Parakou, d'une superficie de 1738 m², est dimensionnée pour recevoir une charge de 23,5kg du Demande Biochimique en Oxygène (DBO5/j) et traiter environ 27 m³ d'eaux usées brutes par jour en provenance du décanteur primaire venant des WC et douches du marché international Arzèkè de Parakou. Elle est située entre 09°20' et 9°20'03'' longitude Nord et 02°37'30'' et 02°37'33'' latitude Est et est adjacente à des terres agricoles (sites maraîchers) (Figure 1).

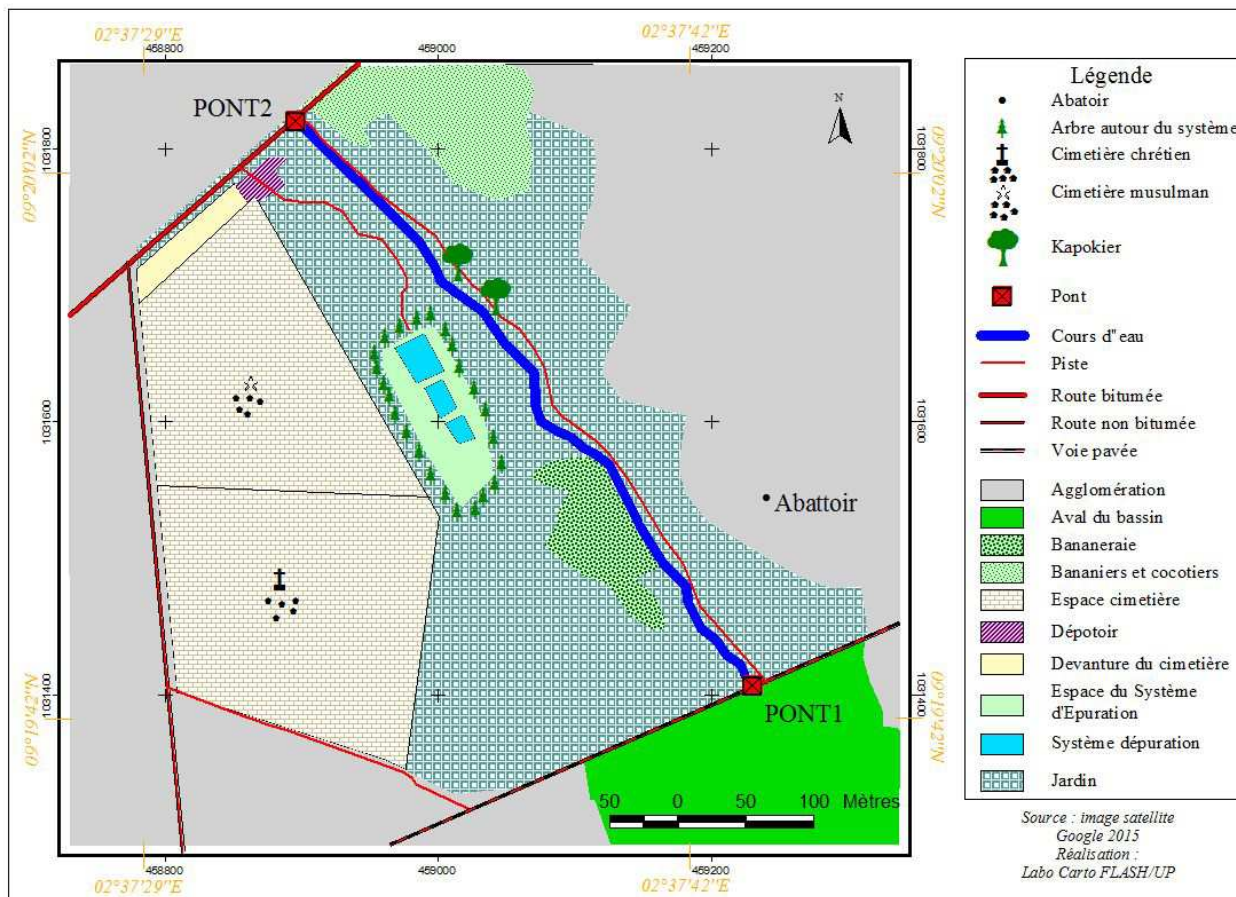


Figure 1 : Situation géographique du lagunage naturel de Parakou.

Elle comporte trois (03) bassins disposés en série (B1=bassin mixte aérobie-anaérobie, B2= bassin facultatif et B3= bassin de maturation) (Figure 2), séparés par des digues en béton armé d'un mètre de largeur et communiquant entre eux par des tuyaux polyvinylchlorure (PVC).

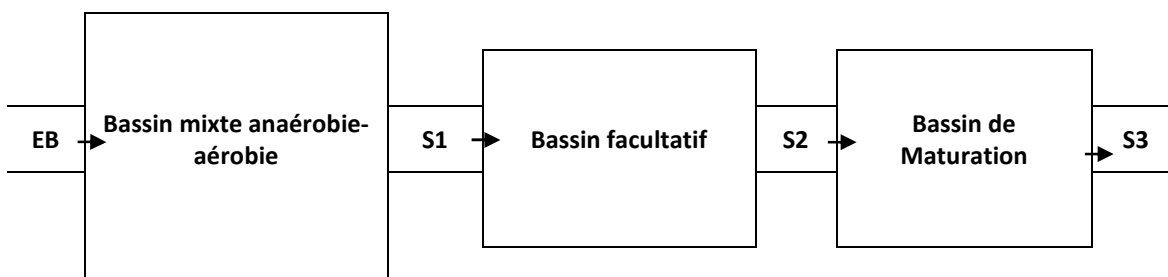


Figure 2 : Schéma descriptif du lagunage naturel de Parakou.

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin3

Les dimensions initiales des bassins sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1: Dimensions et caractéristiques des trois bassins du lagunage de Parakou

Bassin	Profondeur utile (m)	Surface utile (m ²)	Volume utile (m ³)	Caractéristiques
Bassin primaire anaérobie-aérobie				-Appelé lagune de décantation -Bassin mixte anaérobie-aérobie
Zone aérobie	1,40	790	961	
Zone anaérobie	2,00	-	580	
Bassin secondaire aérobie	1,40	474	551	-Bassin secondaire aérobie facultatif -Son rôle principal est la minéralisation des boues.
Bassin de maturation	1,40	474	551	-Bassin de Maturation -Son rôle est l'affinage de l'épuration.

Source : Données du terrain, aout 2014

Les eaux usées circulent par simple gravité d'un bassin à l'autre ; elles se déversent par trop plein dans l'autre. La forme géométrique des bassins ainsi que l'emplacement des ouvrages de communication ont été conçus afin d'éviter les zones d'eaux mortes et les écoulements préférentiels. Le fonctionnement du système est divisé en deux phases principales : une phase primaire de décantation-digestion anaérobie dans le bassin B1 où la matière organique solide est dégradée et liquéfiée ; une phase secondaire de lagunage proprement dite dans les bassins B2 et B3. Au cours du cheminement de l'eau dans cette partie, deux (02) composantes essentielles contribuent à l'épuration : les micro-organismes qui décomposent la matière organique et les microphytes qui absorbent ces substances issues de la dégradation microbienne tout en leur fournissant un microclimat favorable à leur croissance (métabolites, O₂ dissous, etc.).

2.2 METHODES

2.2.1 ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DES DIFFERENTS BASSINS D'EPURATION

Les paramètres couramment utilisés pour le dimensionnement des bassins d'épuration en traitement secondaire sont principalement : la charge organique, le temps de séjour hydraulique et la charge hydraulique. Le temps de séjour est intimement corrélé à la charge hydraulique et correspond en général à la durée optimale de contact des polluants à dégrader avec les microorganismes responsables de l'épuration dans les bassins. Les performances épuratoires sont aussi bien influencées par les facteurs biogéochimiques que par l'hydraulique et les conditions climatiques. En effet, le temps de séjour hydraulique est l'un des principaux paramètres qui contrôlent la répartition de l'eau dans la totalité du volume des bassins, et le temps de contact entre la microfaune (bactéries, protozoaires, micro-invertébrés) et la pollution à dégrader. Les conditions climatiques jouent également un rôle important sur l'hydraulique des bassins. Il s'agit ici d'évaluer le débit d'eaux usées à l'entrée de la station et de déterminer le temps de séjour des eaux usées dans les différents bassins.

2.2.1.1 DONNÉES COLLECTÉES

- **MESURE DU DÉBIT**

Le débit hydraulique journalier d'eaux usées a été déterminé trois fois par jour (matin entre 7h - 8 h, midi entre 12h - 13h et l'après-midi entre 17h - 18h) pendant deux semaines discontinues à l'aide d'un récipient gradué de 7 litres de contenance et d'un chronomètre à l'entrée du bassin de tête.

- **DÉTERMINATION DU TEMPS DE SÉJOUR**

Le calcul du temps de séjour a tenu compte du volume d'encombrement des bassins, de la pluviométrie, de l'évaporation, du volume réel stade projet et du débit déterminé.

- **MESURE DE L'ENCOMBREMENT**

Cette mesure a consisté à :

- ✓ discrétiser le bassin de tête en **dx.dy avec dx=2m et dy=2m**
- ✓ relever la profondeur de l'eau à chaque nœud et la hauteur dénoyée du bassin

La hauteur d'encombrement (Zi) a été estimée en utilisant la formule : $Z_i = H - h_i - P_i$ avec P_i profondeur ou lame d'eau, h_i hauteur dénoyée au nœud i, H profondeur projet du bassin (3,40 m). Les données de pluviométrie et d'évaporation ont été obtenues grâce à la station ASECNA de Parakou suivant la période de l'étude.

– DÉTERMINATION DU TEMPS DE SÉJOUR RÉEL

$TS = V / Q = P_i \times S / Q$ avec P_i = profondeur ou lame d'eau ; S= Surface utile qui est de 790 m² et Q=débit moyen journalier.

2.2.2 EVALUATION DE LA QUALITE DE L'EAU DES BASSINS

Dans toute station d'épuration des eaux usées il est nécessaire d'effectuer des analyses de l'eau brute et de l'eau traitée afin de déterminer différents paramètres tels que les paramètres physicochimique et bactériologiques permettant d'évaluer le niveau de pollution dans chaque phase de traitement. Les analyses ne sont valides que si le prélèvement et l'échantillonnage ont été entourés de soins suffisants; la séquence prélèvement-échantillonnage-conservation-analyse constitue alors une chaîne cohérente pour laquelle on aura conscience de ne négliger aucun maillon.

2.2.2.1 METHODOLOGIE D'ÉCHANTILLONNAGE ET DE MESURE

Il a été adopté un échantillonnage composite et des mesures hebdomadaires sur une période de 10 semaines (juin 2014 - juillet 2014). Les échantillons sont prélevés à l'entrée et à la sortie de chaque bassin afin de suivre la part d'épuration à chaque stade, et la capacité épuratoire de l'ensemble de la station.

Les paramètres physico-chimiques globaux (Température, O₂ dissous, pH, conductivité) ont été mesurés in situ respectivement au moyen d'un oxythermomètre (Oxi 330i, WTW), d'un pH-mètre (H13292 ATC Conductivity) et d'un conductivimètre (HANNA) sur des échantillons ponctuels prélevés 3 fois par jour (matin entre 7h - 8 h, midi entre 12h - 13h et l'après-midi entre 17h - 18h) (Tableau 2).

Tableau 2 : Paramètres analysés et méthodes utilisées

Paramètres	Unités	Réactifs/Méthodes d'analyse/Appareils	Références
pH	-	pH-mètre	H13292 ATC Conductivity
O ₂ et T	mg/l - °C	Oxythermomètre	Oxi 330i, WTW
Conductivité	µS/cm	Conductivimètre	HANNA
MES	mg/l	Filtration sur filtre GFC et séchage à 105°C	AFNOR, T90-105
DBO ₅	mg/l	Méthodes manométriques	Méthode standard
DCO	mg/l	Méthode par digestion	Programmes Hach Réacteur 3 - 150 / 20- 1500 et 200 - 15.000
N-NH ₄ ⁺	mg/l	Méthode Nessler	Programmes Hach
N-NO ₃	mg/l	méthode colorimétrique	Programmes Hach
PO ₄ ³⁻	mg/l	Méthode Molybdovanadate	Programmes Hach

Source : Données du terrain, aout 2014

Les paramètres physico-chimiques et biologiques (la DBO₅, la DCO, les MES, l'Azote, phosphore) ont été mesurés sur des échantillons composites journaliers prélevés une fois par semaine et ceci pendant 10 semaines à l'entrée et à la sortie de chaque bassin. Pour les matières en suspension (MES), la méthode de mesure adoptée est celle de la pesée différentielle par filtration sur filtre GFC et séchage à 105°C (AFNOR, T90-105). La demande chimique en oxygène est analysée par oxydation en excès au dichromate de potassium à chaud en milieu acide (méthode AFNOR). La DBO₅ a été évaluée par la méthode manométrique basée sur le principe WARBURG.

Pour le bassin facultatif et le bassin de maturation, les mesures de la DBO₅ sont effectuées aussi bien sur les échantillons bruts que sur les échantillons filtrés. Une estimation de la DBO₅ en Kg/jour a été faite en utilisant la formule suivante :

$$DBO5 \text{ (Kg/j)} = \text{Débit (l/j)} * DBO5 \text{ (Kg/l)}$$

Le phosphore total est mesuré sur des échantillons bruts après minéralisation en milieu acide tandis que les nitrates sont mesurés sur les échantillons filtrés par la méthode colorimétrique au moyen du spectrophotomètre (HACH) DR/2010. Le dosage du NTK est fait par distillation précédé d'une minéralisation en milieu acide de l'azote organique en azote ammoniacal.

Les analyses bactériennes (Coliformes totaux, *E. coli*, Salmonelles) ont été faites sur des échantillons composites avec une fréquence d'une fois par semaine pendant 10 semaines. Les coliformes thermotolérants sont dénombrés sur des milieux de cultures spécifiques : Chrom-agar ECC à 37°C (Tableau 3).

Tableau 3: Caractéristiques et méthodes de mise en évidence de quelques bactéries

	Coliformes totaux	<i>E. coli</i>	<i>Salmonella spp</i>
Milieu liquide à 37°C en 24h	-	-	Rappaport Vassiliadis Bouillon selenite
Milieu solide en 24h	Chrom-agar ECC à 37°C	Chrom-agar ECC à 37°C	Hektoen à 37°C
Techniques utilisées	Ensemencement direct en surface	Ensemencement direct en surface	Enrichissement : Striation
Observation	Colonies rouges	Colonies bleues	Colonies vertes à centre noir

Source : Données du terrain, aout 2014

2.2.3 ANALYSE ET TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES

Le traitement des données a été réalisé grâce aux logiciels Excel et SPSS. Les données ont été saisies dans Excel et transportées par la suite dans SPSS pour une analyse descriptive (moyenne, écart-type, maximum et minimum) et une Analyse en Composantes Principales. Les données collectées ont été comparées aux normes internationales et béninoises

3 RESULTATS

3.1 CARACTÉRISTIQUES DE L'INFLUENT BRUT

Les caractéristiques de l'influent brut admis en tête de la filière sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4: Composition des eaux usées brutes admises dans le lagunage naturel de Parakou de juin à août 2014

Paramètres	m	se	Extrema	Nombre d'échantillons
Débit (m ³ /j)	30,48	3,14	26,08–36,29	42
pH	7,54	0,11	7- 8	10
Conductivité (µS/cm)	1777,00	77,65	1310 - 2030	10
TDS (ppm)	888,60	38,82	655 - 1015	10
Température (°C)	28,89	0,30	27,4 - 30,3	10
Couleur (Pt-Co)	4805,00	842,90	2050 - 10875	10
Turbidité (FTU)	1576,80	355,16	300 - 3150	10
pH	7,54	0,11	7- 8	10
Conductivité (µS/cm)	1777,00	77,65	1310 - 2030	10
MES (mg/l)	2010,00	453,00	200 - 4300	10
DCO (mg/l)	6699,00	1321,75	1280 - 14400	10
DBO5 (mg/l)	1152,50	293,39	250 - 2825	10
NO ₃ ⁻ (mg/l)	266,90	47,38	14,71 - 462	10
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,45	0,10	0,08 - 0,98	10
NH ₄ ⁺ (mg/l)	199,76	19,75	147,06 - 331,53	10
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	129,53	19,40	19 - 206	10
Coliformes Totaux (ulog)	6,18	4,59	5,24 – 6,34	10
<i>E. coli</i> (ulog)	5,24	4,56	4,99 – 5,43	10

n= nombre d'échantillons analysés ; m=moyenne ; se=erreur standard ; ulog = Unités logarithmiques

Source : Données du terrain, aout 2014

La charge polluante moyenne de l'influent brut est très élevée (2010 mg MES/l, 6699 mg DCO/l et 1152,50 mg DBO5/l). Les valeurs de pH évoluent dans une gamme de 7 - 8. La température moyenne est de $28,89 \pm 0,30^{\circ}\text{C}$ avec un minimum de $27,40^{\circ}\text{C}$ enregistré dans le mois d'août et un maximum de $30,30^{\circ}\text{C}$ enregistré dans le mois de juin. L'oxygène dissous varie de 0,07-2,93 mg/l avec une moyenne de $0,85 \pm 0,33$ mg/l. Le plus faible taux d'oxygène a été enregistré vers fin août. Le TDS a varié d'une période à une autre avec une moyenne de 888,60 ppm. Proportionnelle à la quantité des sels ionisables dissous, la conductivité constitue une bonne indication du degré de minéralisation d'une eau. Dans l'influent brut, elle est en moyenne de 1777 microsiemens/cm. Les eaux usées brutes présentent des charges en coliformes totaux variant de $1,72 \times 10^5$ - $2,20 \times 10^6$ UFC avec une valeur moyenne de $1,51 \times 10^6$ UFC soit 6,18 ulog. Pour les germes d'*E. coli*, on a relevé des valeurs comprises entre 4,99 à 5,43 ulog.

3.2 EVOLUTION DE LA DCO ET DE MES

En superposant l'évolution de l'oxygène à celle de la DCO, on voit que les fortes concentrations en oxygène dissous sont observées lorsque la DCO totale est faible. A la sortie du bassin de tête, bassin contaminé, on assiste à une augmentation de la DCO au début de l'étude. Une autre augmentation est observée en mois d'août (figure 3).

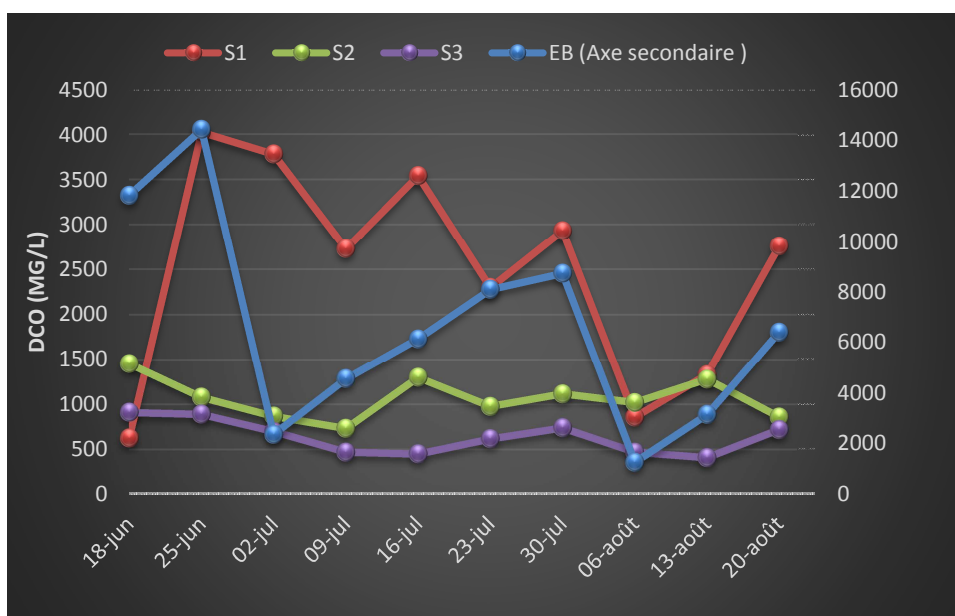


Figure 3: Variation des concentrations en DCO aux sorties des trois bassins de lagunage de Parakou au cours de la période de l'étude.

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin3

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

Les teneurs en MES de l'eau brute et de l'eau sortie des différents bassins présentent de grandes variations (400 à 3600 mg/l) au cours de la période d'étude. L'eau brute présente de fortes teneurs en MES au début de l'étude (4300 mg/l) et vers fin juillet (3600 mg/l) (figure 4).

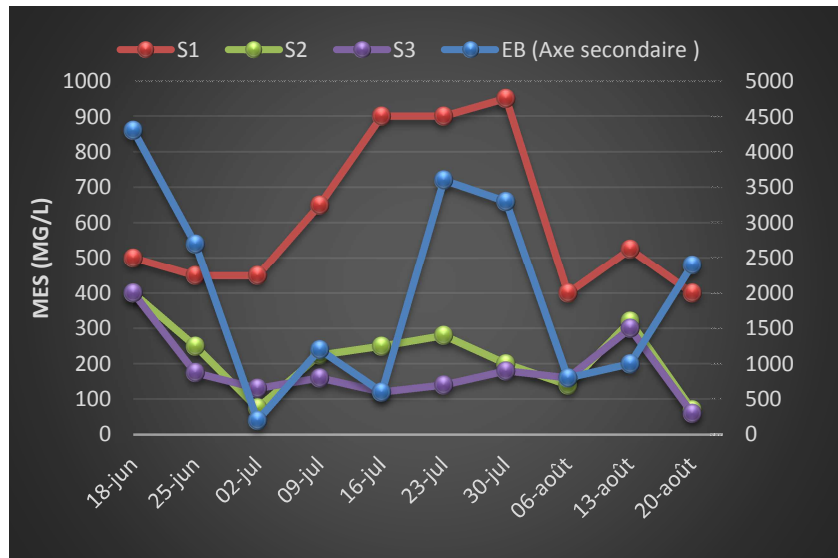


Figure 4 : Variation des concentrations en DCO aux sorties des trois bassins de lagunage de Parakou au cours de la période de l'étude

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin3

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

3.3 EVOLUTION DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE

L'évolution de l'azote ammoniacal et des ortho-phosphates durant de la période de l'étude est présentée dans les figures 5 et 6. Pour tous les effluents, on observe une stabilité relative dans le mois de juillet pour les deux paramètres. Les teneurs en azote ammoniacal varient de 147,06 à 285,09 mg/l, de 89,01 à 233,49 mg/l, de 63,86 à 147,06 mg/l respectivement aux sorties des bassin 1, bassin 2 et bassin 3. Quant aux teneurs d'ortho-phosphates, on observe une augmentation plus ou moins régulière au niveau des trois effluents avec de fortes valeurs vers la fin du mois d'août (197 mg PO₄/l, 232 mg PO₄/l et 265 mg PO₄/l respectivement aux sorties des bassin 1, bassin 2 et bassin 3).

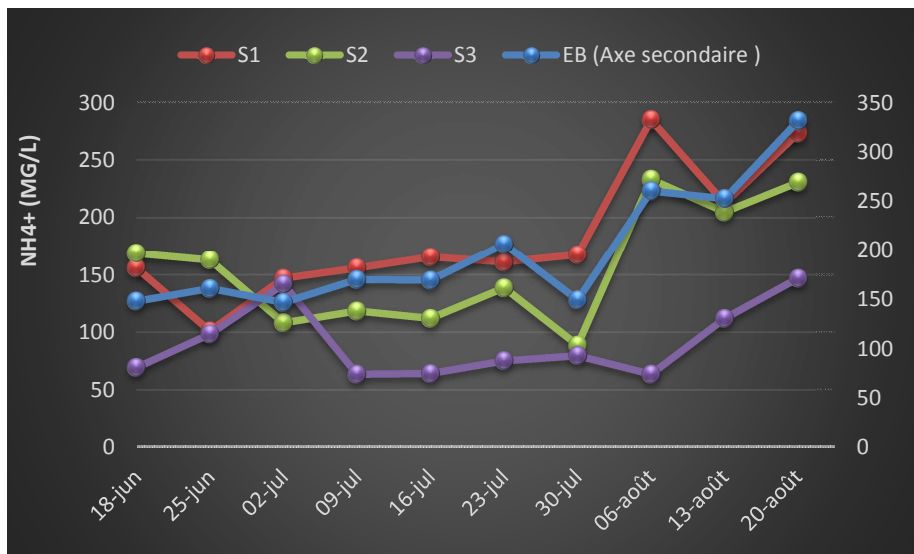


Figure 5: Variation des concentrations en Azote ammoniacal aux sorties des trois bassins de lagunage de Parakou au cours de la période de l'étude

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin3

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

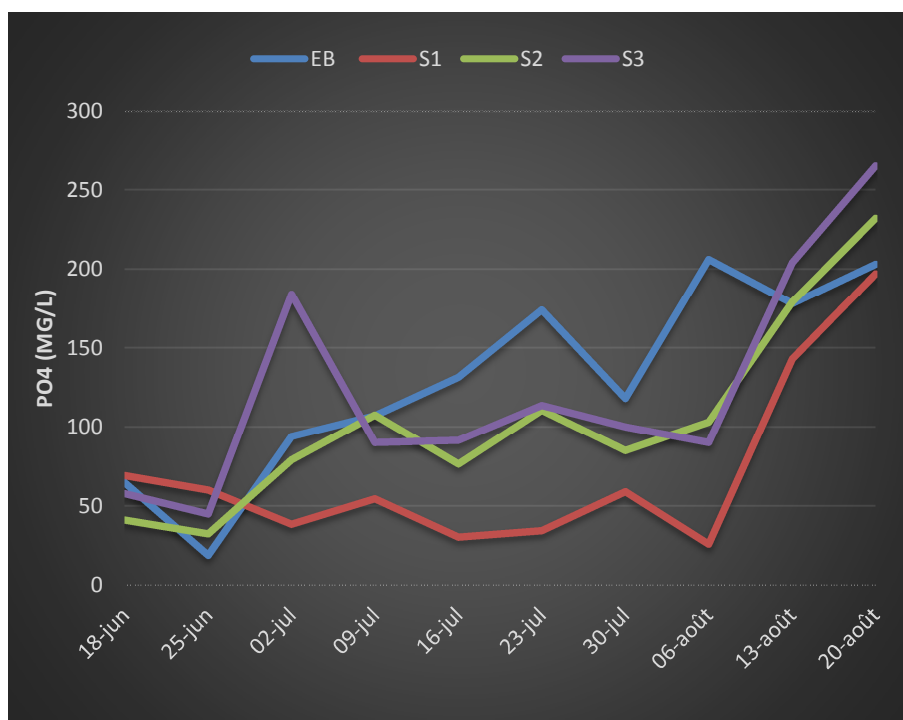


Figure 6: Variation des concentrations en Ortho-phosphates aux sorties des trois bassins de lagunage de Parakou au cours de la période de l'étude

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

3.4 RENDEMENTS ÉPURATOIRES

3.4.1 ELIMINATION DE LA CHARGE ORGANIQUE

Le tableau 5 présente respectivement les abattements et rendements épuratoires moyens en MES, DBO5, DCO des effluents.

Tableau 5 : Abattements moyens en MES, DBO5 et DCO de l'effluents de juin à août 2014

Paramètres	Valeurs extrêmes	m	se	n
MES	160-3940 (34,84 - 97,50)*	1876,33 (82,39)*	18,86	10
DBO5	200-2655 (52-98,23)*	1070,5 (86,04)*	13,53	10
DCO	1270-13849 (63,20 - 93,82)*	6041,4 (86,18)*	10,53	10

n= nombre d'échantillons analysés ; m=moyenne ; se=erreur standard ; *= performance en %

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

La figure 7 montre l'évolution des paramètres indicateurs de la pollution dans les différents bassins le long des deux filières de traitement. Globalement, on note une forte réduction des polluants dans les trois bassins.

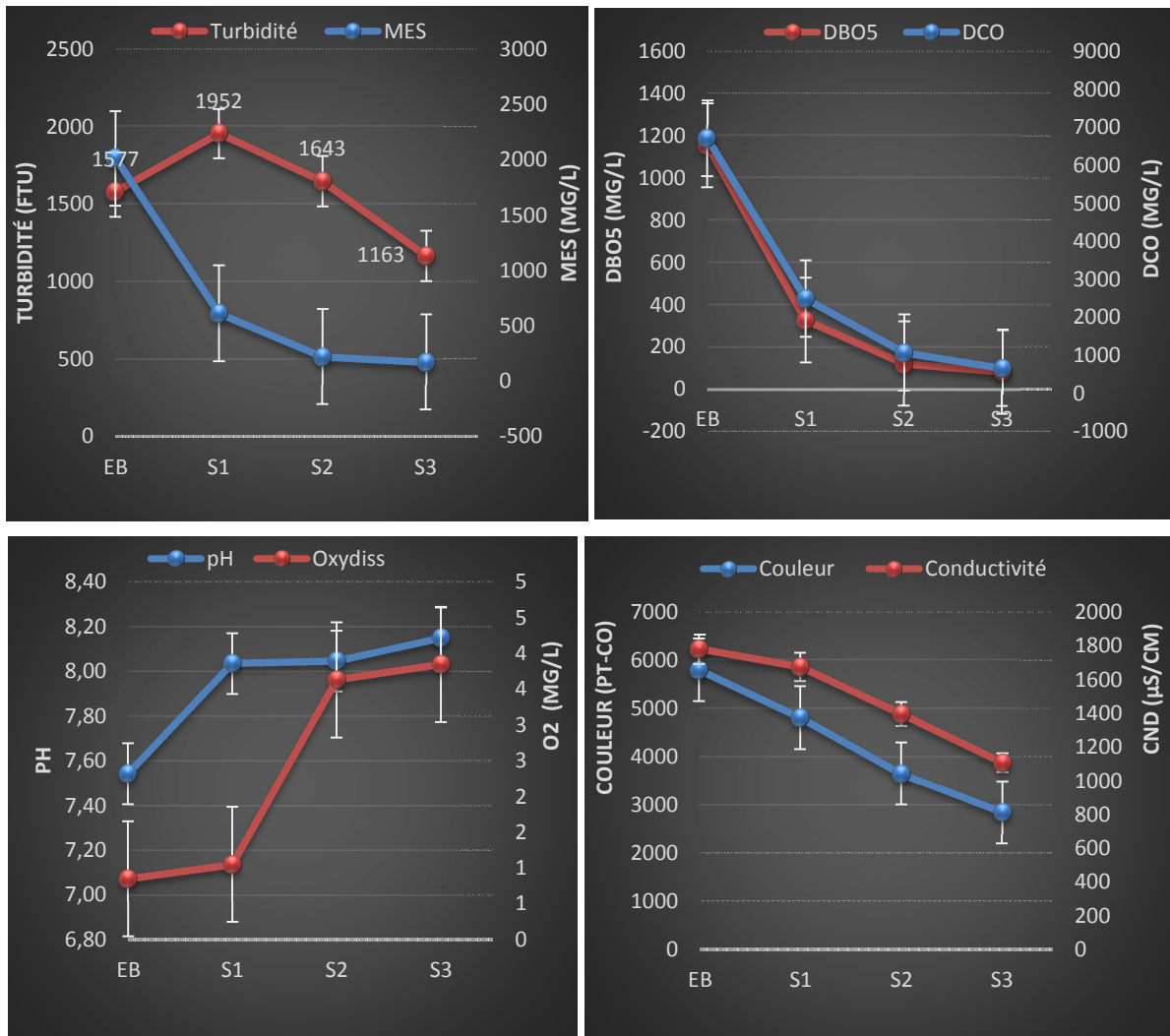


Figure 7 : Profils de quelques paramètres caractéristiques de la pollution le long des bassins de lagunage de Parakou de juin à août 2014

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin3

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

La DBO5 atteint des valeurs beaucoup plus importantes dans le bassin facultatif que dans le bassin de maturation, respectivement de $120 \pm 12,20$ mg/l et $82 \pm 11,91$ mg/l. Les concentrations résiduelles en DBO5 de l'effluent traité varient entre 50 et 170 mg/l. Les rendements moyens d'abattement de la pollution sur la période de suivi sont de 82,39% pour les MES, 86,04% pour la DBO5 et 86,18% pour la DCO. Pour la DBO5 et la DCO, les rendements d'épuration suivent une même allure dans le temps avec une stabilité dans le mois de juillet. Ces valeurs restent dans les intervalles de (52% - 98,23%) et de (63,20% - 93,82%) respectivement pour la DBO5 et la DCO (Figure 8).

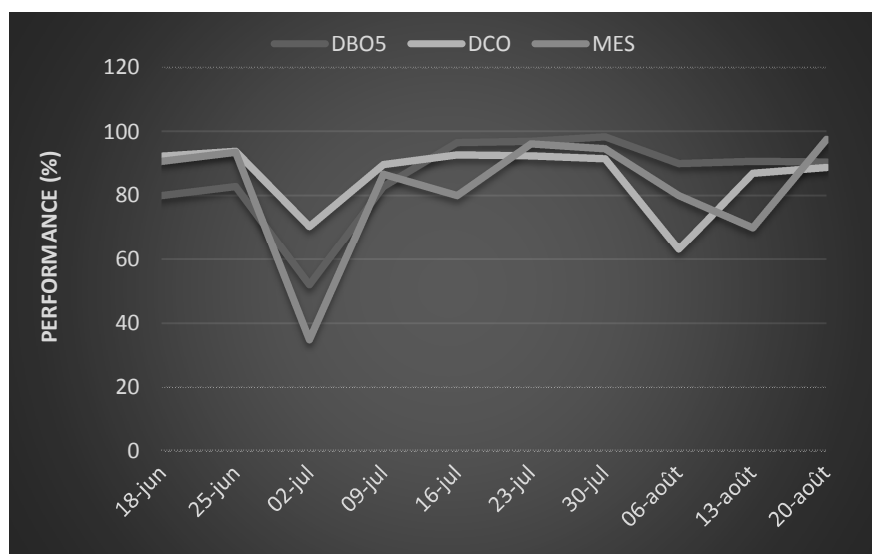


Figure 8 : Rendements épuratoires en DBO5, DCO et MES des bassins de lagunage de Parakou durant la période de l'étude.

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

La stabilité du rendement épuratoire de la filière pour ces deux paramètres est confirmée par l'évaluation des écarts types et des coefficients de variation qui sont respectivement de 13,53% et 15,72% pour la DBO5, 10,53% et 12,22% pour la DCO. Dans 90% des mesures de la DBO5 sur l'effluent traité, les performances épuratoires ont été supérieures à 80% (n = 9). Par contre, pour les MES, on observe de grandes fluctuations pour l'abattement global à la sortie de la station (Figure 6-9). A la sortie du bassin de maturation (S3), on relève une variation importante des concentrations en MES avec un coefficient de variation de 22,89% et la teneur moyenne est de 133,67mg/l avec un minimum observé de 40 mg/l et un maximum de 360 mg/l. La qualité de l'effluent à la sortie en terme de MES répond aux normes de rejet recommandées par la directive de l'Union Européenne (< 150 mg/l). Ceci est le cas dans 50% des mesures effectuées (n=5).

3.4.2 ELIMINATION DES NUTRIMENTS

Etant donné que l'ammonium est la forme dominante d'azote, nous faisons l'hypothèse que son élimination traduit également celle de l'azote total. L'élimination de l'azote a été analysée sous trois formes à savoir : l'azote ammoniacal, l'azote nitreux et l'azote nitrique. Pour le phosphore, ce sont les ortho-phosphates qui ont été analysés. Les figures 9 et 10 présentent respectivement les concentrations et les rendements en phosphore durant la période de l'étude.

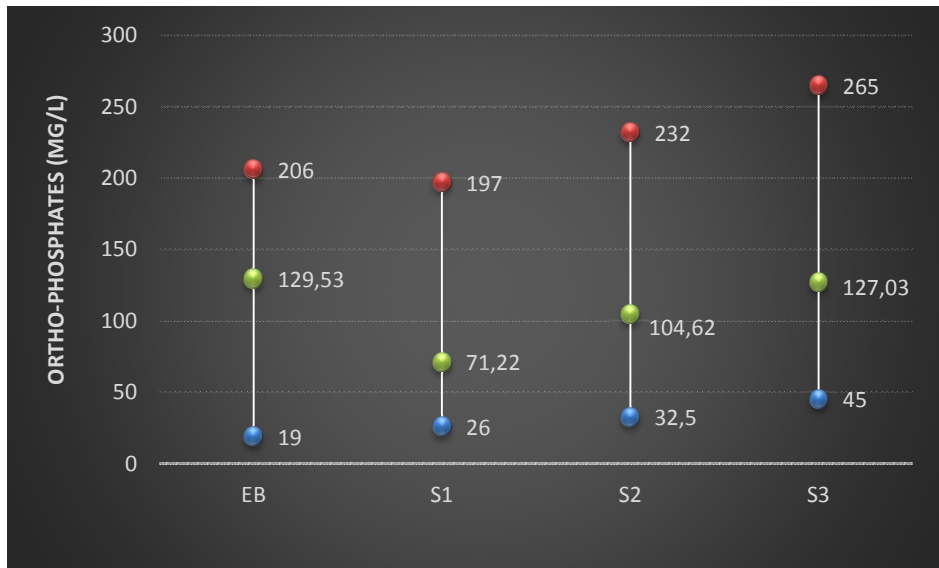


Figure 9 : Teneurs en Ortho-phosphates de l'eau brute et aux sorties des bassins de lagunage de Parakou de juin à août 2014.

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin3

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

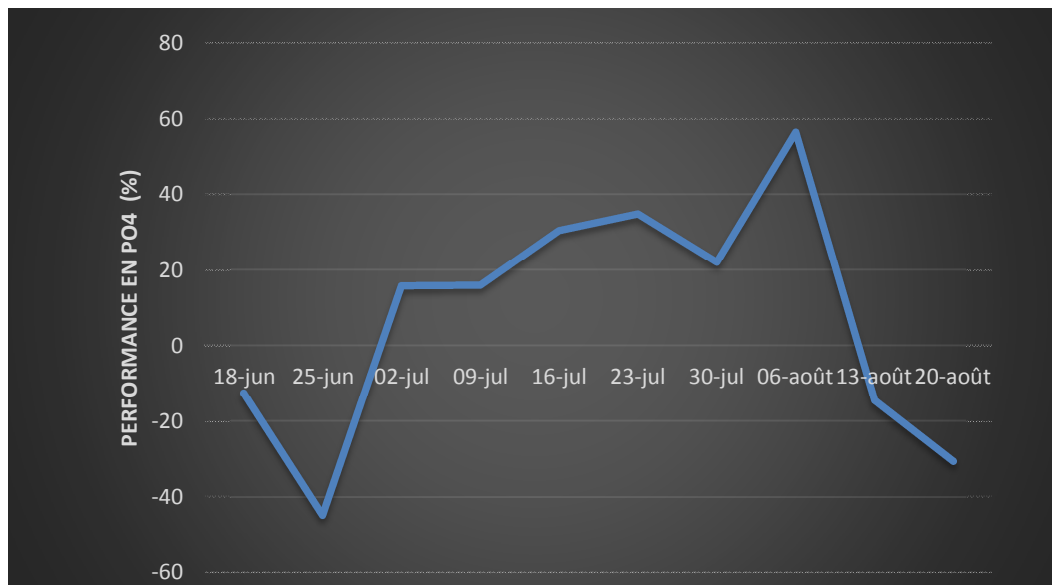


Figure 10: Rendements épuratoires en phosphore des bassins de lagunage de Parakou durant la période de l'étude.

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

Les teneurs résiduelles en ortho-phosphates de l'effluent à la sortie de la station varie de 45 à 265 mg/l avec une moyenne de 127,03 mg/l. Le niveau d'élimination du phosphore est globalement faible et instable avec un rendement d'élimination moyen de 19,75% pour les ortho-phosphates. Cette instabilité est confirmée par l'évaluation des écarts types et des coefficients de variation qui sont respectivement de 31,75% et 7,45. Les rendements négatifs en ortho-phosphates ont souvent été observés notamment durant les périodes d'encombrement des bassins et plus particulièrement dans le bassin anaérobie. Ceci a été observé en juin et fin août (n=4).

Les figures 10 et 11 présentent respectivement les concentrations en phosphore et en azote (moyenne, minimum et maximum) mesurées dans l'eau brute et aux sorties des bassins durant la période de l'étude. La figure 15 présente les rendements épuratoires en azote ammoniacal et en nitrate durant cette période. L'eau traitée présente en sortie des teneurs

moyennes en azote ammoniacal et azote nitreux élevées (de l'ordre de 91,91 mg/l et 0,71 mg/l respectivement) (figure 11 et 12). Les rendements épuratoires en azote atteignent en moyenne 53,98%, se chiffrant par moment au-dessus de 75%. Les concentrations résiduelles en nitrates de l'effluent traité sont élevées (avec une moyenne de 160,32 mg/l et un maximum de 242 mg/l). Les rendements épuratoires en nitrates évoluent inversement à ceux d'azote ammoniacal avec une moyenne de 39,93% (figure 11).

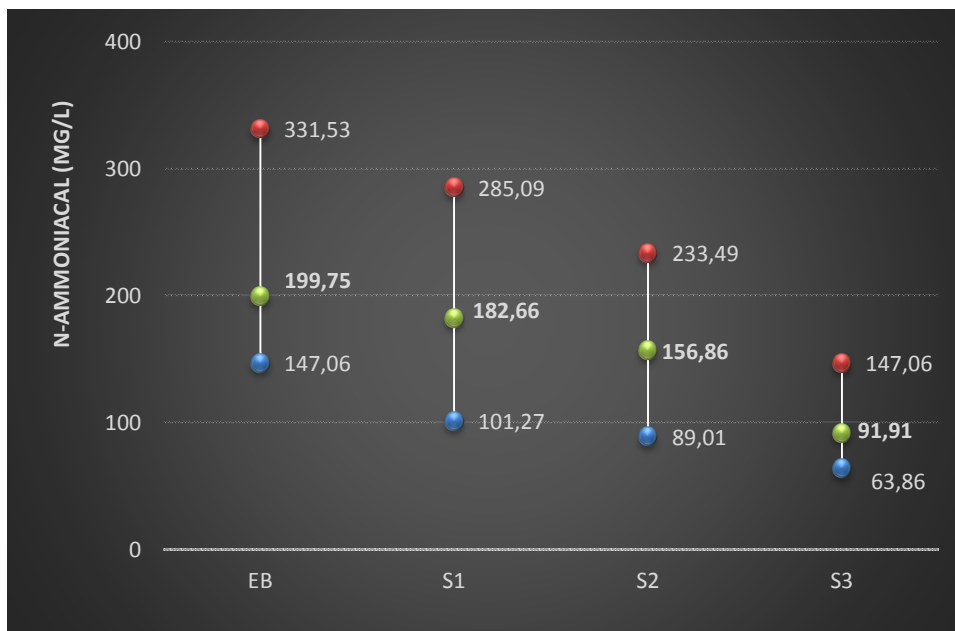


Figure 11: Teneurs en azote ammoniacal de l'eau brute et de l'effluent aux sorties des bassins de lagunage de Parakou de juin à août 2014

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin3

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

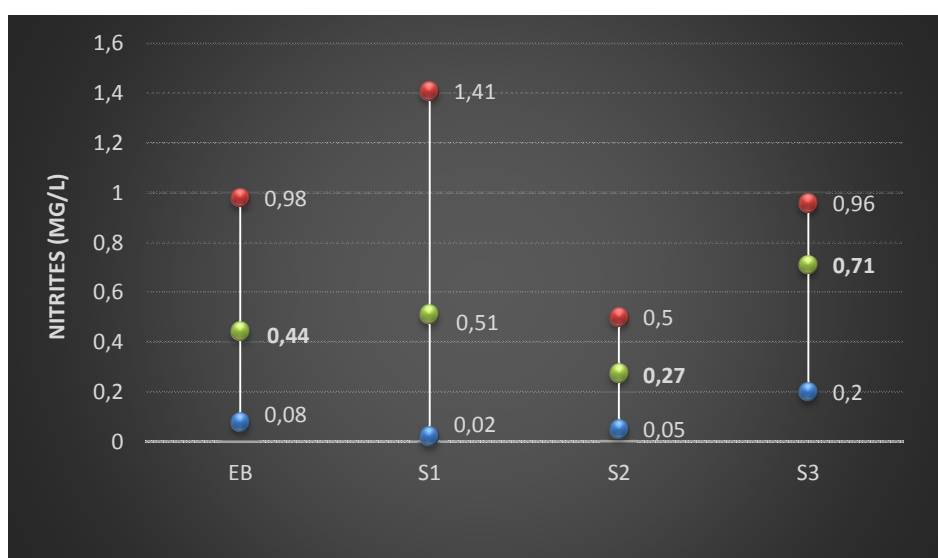


Figure 12 : Teneurs en nitrites de l'eau brute et de l'effluent aux sorties des bassins de lagunage de Parakou de juin à août 2014

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

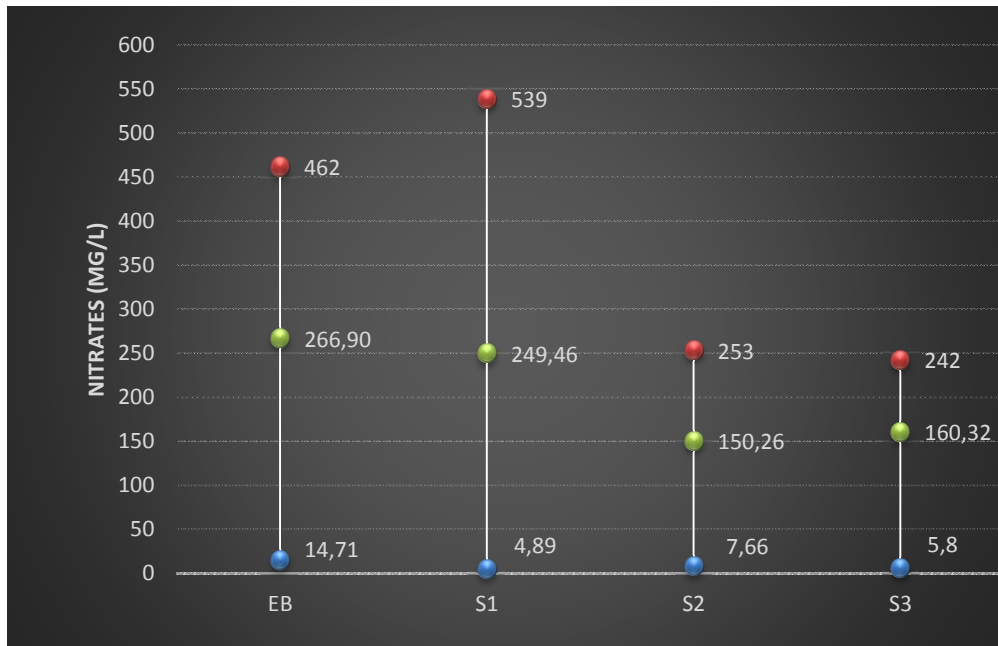


Figure 13: Teneurs en nitrates de l'eau brute et de l'effluent aux sorties des bassins de lagunage de Parakou de juin à août 2014

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin3

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

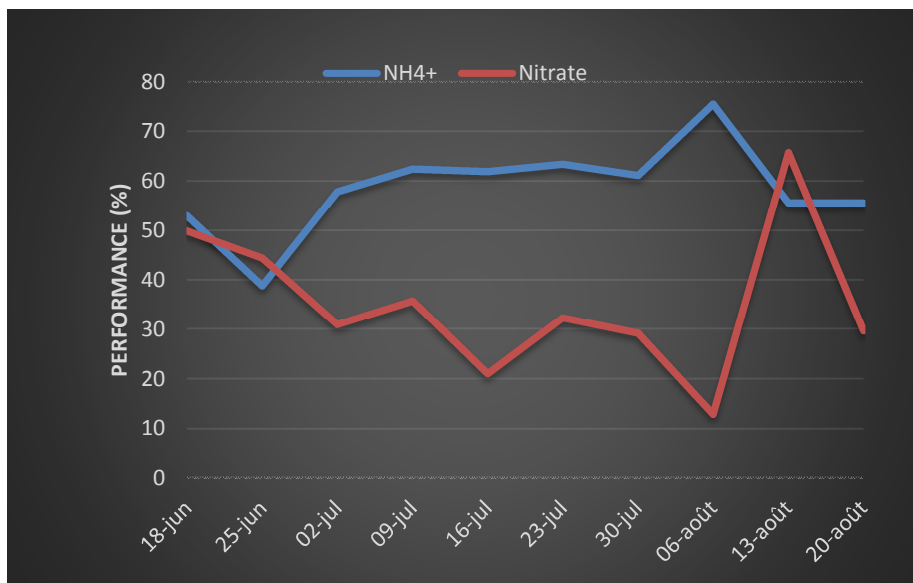


Figure 14: Rendements épuratoires en azote ammoniacal et en nitrate des bassins de lagunage de Parakou durant la période de l'étude

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

3.4.3 ELIMINATION DE LA POLLUTION BACTÉRIENNE

L'abattement de la pollution bactérienne et parasitaire a été évalué avec comme indicateurs d'une part, les coliformes totaux et les germes d'*Escherichia Coli* et d'autre part par la présence des salmonelles. Le tableau 6 présente les valeurs moyennes, maximum, minimum d'Unités Format Colonies (UFC) mesurées sur 10 échantillons durant la période de l'étude sur l'eau brute et l'effluent à la sortie de chaque bassin. Les eaux usées brutes présentent des charges en coliformes totaux

variant de $1,72 \times 10^5$ à $2,20 \times 10^6$ UFC /100 ml avec une valeur moyenne de $1,51 \times 10^6$ UFC/100 ml. Dans l'effluent traité à la sortie de la filière, la teneur résiduelle en coliformes totaux est en moyenne de $4,92 \times 10^3$ UFC/100 ml soit 3,69 ulog, avec un minimum de $2,48 \times 10^3$ UFC/100 ml soit 3,39 ulog et un maximum de $8,95 \times 10^4$ UFC/100 ml soit 4,95 ulog. On a ainsi enregistré au cours de la période de l'étude des valeurs résiduelles en coliformes totaux avec un maximum de $2,72 \times 10^3$ UFC/100 ml (3,43 ulog) en fin juin correspondant à une élimination de 85,68% (Figure 15).

Tableau 6 : Coliformes totaux dénombrés en UFC/100ml dans les échantillons par niveau d'épuration de juin à août 2014

Echantillons	Valeurs extrêmes	m	n
EB	$1,72 \times 10^5 - 2,20 \times 10^6$	$1,51 \times 10^6$	10
S1	$9,64 \times 10^4 - 2,00 \times 10^6$	$3,40 \times 10^5$	10
S2	$1,01 \times 10^4 - 1,28 \times 10^5$	$8,40 \times 10^4$	10
S3	$2,48 \times 10^3 - 8,95 \times 10^4$	$4,92 \times 10^3$	10
Rendement moyen (%)	85,68 - 94,29	89,55	10

n= nombre d'échantillons analysés; m=moyenne; EB=Eaux Brutes ; S1=Sortie Bassin n°1 ; S2= Sortie Bassin n°2 ; S3= Sortie Bassin n°3

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

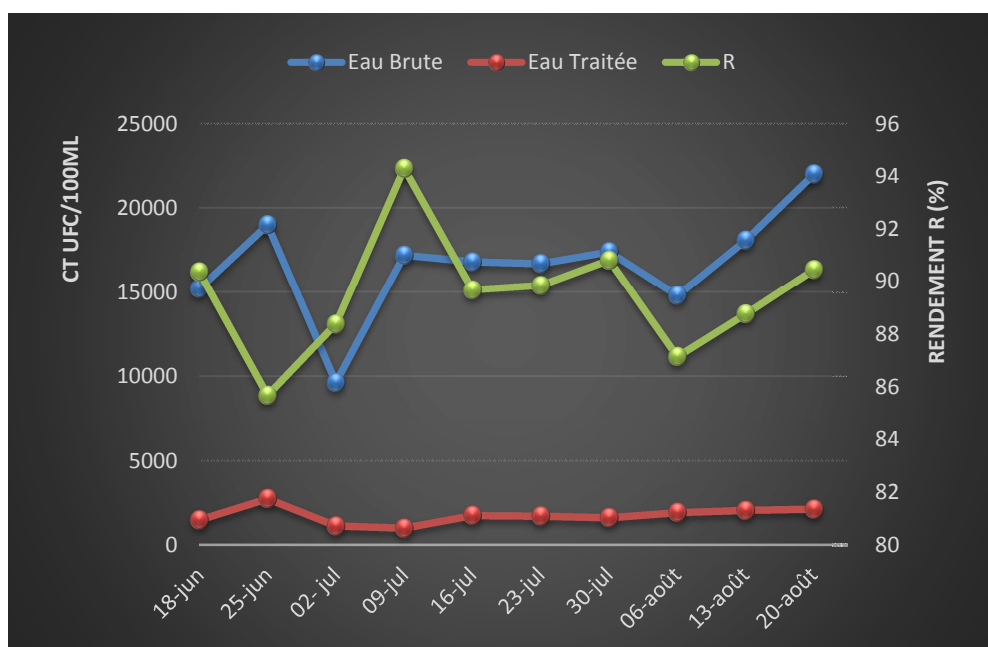


Figure 15: Variation des concentrations en Coliformes totaux/100 ml de l'influent brute, l'effluent traité, le rendement (R) épuratoire des bassins de lagunage de Parakou au cours de la période de l'étude

CT=Coliformes Totaux

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

Les analyses ont révélé sur la présence de germes d'*Escherichia Coli* et de trois espèces différentes de *Salmonella* (*S. typhi*, *S. typhinurium* et *S. Enteritidis*). La charge de l'eau brute en germes d'*Escherichia Coli* est de l'ordre de $1,73.10^5$ UFC/100 ml (Tableau 7).

Tableau 7: Germes d'Escherichia coli dénombrés en UFC/100ml par niveau d'épuration de juin à août 2011

Echantillons	Valeurs extrêmes	m	n
EB	$9,82 \times 10^4 - 2,72 \times 10^5$	$1,73 \times 10^5$	10
S1	$1,12 \times 10^4 - 2,45 \times 10^4$	$1,63 \times 10^4$	10
S2	$1,80 \times 10^3 - 1,06 \times 10^4$	$7,13 \times 10^3$	10
S3	$3,40 \times 10^2 - 3,48 \times 10^3$	$1,07 \times 10^3$	10
Rendement moyen (%)	59,26 - 92,67	81,33	

n= nombre d'échantillons analysés; m=moyenne; EB=Eaux Brutes; S1=Sortie Bassin n°1; S2=Sortie Bassin n°2 ; S3= Sortie Bassin n°3

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

Dans l'effluent traité à la sortie de la filière, la teneur résiduelle d'Escherichia Coli est en moyenne de $1,07.10^3$ UFC/100 ml soit 3,03 ulog, avec un minimum de $3,40.10^2$ UFC/100 ml (soit 2,53 ulog) et un maximum de $3,48.10^3$ UFC/100 ml (soit 3,54 ulog). On a ainsi enregistré au cours de la période de l'étude des valeurs stables élevées d'abattement d'Escherichia Coli dans le mois de juillet avec un maximum de 92,67% (Figure 16).

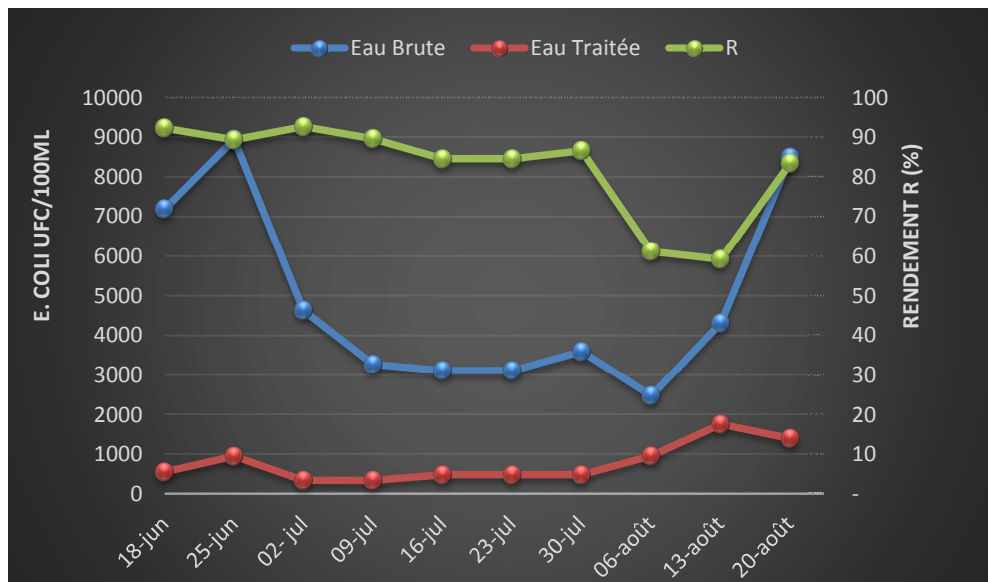


Figure 16: Variation des concentrations en germes d'Escherichia coli/100ml de l'influent brute, l'effluent traité, le rendement épuratoire (R) des bassins de lagunage de Parakou au cours de la période de l'étude

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

Pour les salmonelles, on a relevé des fréquences de 100% pour les trois espèces dans les eaux brutes (Figure 17). Trois espèces de Salmonelles ont été retrouvées dans les 10 échantillons d'eaux brutes prélevées (Fréquence = 100%). Durant l'étude, nous constatons une baisse de la fréquence des salmonelles. Ainsi, à la sortie de la filière, les salmonelles sont partiellement éliminées à hauteur de 40% à 50% (Figure 17).

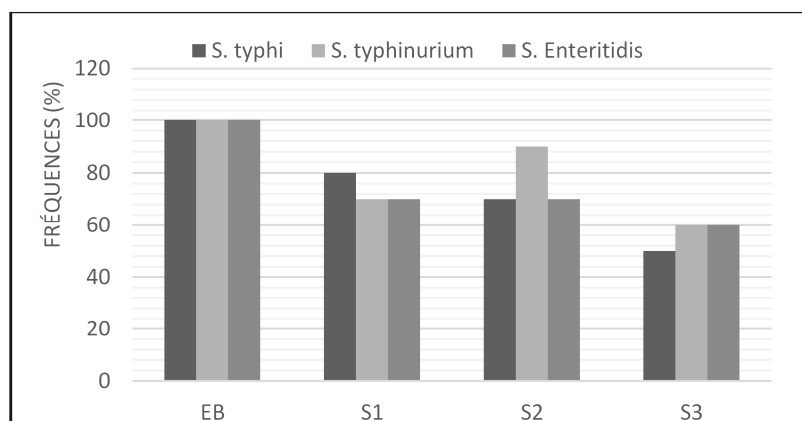


Figure 17 : Fréquences d'apparition de différentes espèces de Salmonelles des bassins de lagunage de Parakou de juin à août 2014

EB=Eau Brute décantée ; S1=Sortie Bassin1 ; S2=Sortie Bassin2 ; S3=Sortie Bassin3

Source : Données d'enquêtes, aout 2014

4 DISCUSSION

4.1 CARACTÉRISTIQUES DE L'INFLUENT BRUT

Il est responsable de la forte concentration des polluants. La charge moyenne appliquée est d'environ 35 kg de DBO5/jour. Dimensionnée pour recevoir une charge de 23,5kg de DBO5/j et un volume de 27 m³/j, les bassins de lagunage de Parakou reçoivent aujourd'hui une charge supplémentaire de plus de 10 kg de DBO5/jour. L'augmentation des charges à l'entrée de la station est probablement imputable à trois raisons principales:

- une mauvaise estimation des débits dès la conception du système car la mesure est instantanée et est effectuée par un relevé chronométré du temps nécessaire au remplissage d'un récipient gradué. Cette méthode ne prend pas en compte des débits de pointe;
- une augmentation des rejets due à un accroissement probable de la fréquentation du marché, car le marché de Parakou, est un lieu d'attraction pour les populations rurales;
- une défaillance du réseau d'égouts de la station.

Une mesure du comblement du fonds effectuée dans le bassin de tête a permis d'enregistrer un dépôt de boues de l'ordre de 2 m au cours de l'étude, montrant ainsi le comblement total de la zone anaérobie du bassin de tête. Ce comblement inhibe la dégradation de la matière organique par fermentation anaérobie dans ce bassin [8].

Les valeurs de la DCO sortent de la gamme des valeurs de référence pour les eaux usées d'origine domestique avec un rapport moyen de DCO/DBO5 de 5,81 > 5 [9]. Il s'agit d'un influent brut difficilement biodégradable donc toxique [10], [11]. Avec des coefficients de variation pour les MES, la DCO, et la DBO5 respectivement de 23%, 20% et 25%, on est dans une situation de forte variabilité de la qualité de l'influent admis en tête de station, en rapport avec le rythme saisonnier de fréquentation du marché. Les valeurs de pH évoluent dans une gamme de 6 - 9; ce qui est de nature à favoriser le développement bactérien nécessaire à la dégradation biologique des polluants organiques [12]. Les eaux usées brutes présentent des charges en coliformes totaux variant de 1,72 x 10⁵ à 2,20 x 10⁶ UFC /100 ml. Cette charge est du même ordre de grandeur que celle généralement rencontrée dans les effluents urbains [13], [14].

4.2 ELIMINATION DE LA CHARGE ORGANIQUE

Les concentrations résiduelles en DBO5 de l'effluent traité sont supérieures au seuil maximum de 25 mg/l suggéré par la réglementation européenne [15]. L'abattement de la DCO évolue très peu dans les bassins. On peut expliquer ce ralentissement dans l'élimination de la DCO par le fait que les fractions difficilement biodégradables et dissoutes deviennent importantes au cours de l'épuration. En effet, cette phase intervient lorsque la grande partie de MES est éliminée dans les bassins.

Dans 90% des mesures de la DBO5 et la DCO sur l'effluent traité, les performances épuratoires ont été supérieures à 80%, ce qui est très encourageant. Ces résultats sont meilleurs à ceux rapportés dans la littérature où les auteurs ont obtenus des rendements inférieurs à 60 % pour la DCO et la DBO5. Ces rendements sont obtenus pour des charges organiques très variables et pour des temps de séjour compris entre 10 et 27 jours en conditions tropicales [16], [17], [18], [19], [20], [4]. Nos travaux montrent également que la station peut être recommandée pour le traitement d'effluents à fortes charges organiques, destinés à être réutilisés en agriculture [21]. De même, nos rendements obtenus sont similaires à ceux trouvés par [2] qui ont rapporté un rendement moyen de 87% et de 81% respectivement en DBO5 et en DCO dans la station de traitement des eaux usées par lagunage de 2ie (Ouagadougou). Les rendements épuratoires moyens atteignent 82% en MES. Cette valeur est supérieure à celle rapportée par [2] dans des conditions similaires (66 %) sur la station d'épuration du 2ie (Ex EIER). La qualité de l'effluent à la sortie répond aux normes de rejet recommandées par la directive de l'Union Européenne en terme de MES (< 150 mg de MES/l). Ceci est le cas dans 50% des mesures effectuées (n=5).

4.3 ELIMINATION DES NUTRIMENTS

L'effluent traité présente en sortie des teneurs moyennes en azote ammoniacal faibles par rapport à la norme béninoise qui est de 200mg/l. Ces valeurs sont élevées par rapport à la limite tolérable de 5mg/l d'azote kjeldah proposée par [22] et [23] pour un rejet d'effluent dans un écosystème sensible à l'eutrophisation. L'abattement de l'ammonium est régulier pour l'ensemble des bassins. Les rendements épuratoires moyens atteignent respectivement 53,98% et 39,93% pour l'ammonium et les nitrates. L'ammonium est éliminé soit par nitrification (oxydation de l'ammonium en nitrate) puis dénitrification (réduction des nitrates en azote gazeux, N₂), soit par volatilisation (transformation de l'ammonium en ammoniac), soit par le prélèvement des plantes. Chacune de ces réactions est dépendante de l'état d'oxydation du milieu et de la disponibilité en oxygène dissous [24], [25], [26]. En négligeant ici les quantités qui peuvent être prélevées par la biomasse bactérienne ou par volatilisation (pH neutre), on pourrait expliquer la stabilité des concentrations dans le mois de juillet par : une absence de nitrification, une dénitrification rapide ou une assimilation des nitrates produits (par les plantes). Cette période peut aussi correspondre à la phase d'acclimatation de la biomasse nitrifiante, mais on n'observe pas de stabilisation dans l'évolution de l'ammonium au même moment, ce qui permet d'écarter cette hypothèse.

Les teneurs résiduelles en ortho-phosphates de l'effluent à la sortie de la station sont très élevées (2,56 mg de PO₄/l) par rapport à la limite tolérable de 0,1mg/l pour [23]. Le niveau d'élimination du phosphore est globalement faible et instable. Les rendements négatifs en ortho-phosphates ont souvent été observés notamment durant les périodes d'encombrement des bassins [27] et plus particulièrement dans le bassin anaérobie. Tout comme l'azote, le phosphore est un constituant essentiel pour le développement des plantes, sa disponibilité ayant une influence directe sur leur croissance. Donc, sa disponibilité dans l'effluent traité serait un atout important dans une perspective de réutilisation en agriculture.

4.4 ABATTEMENT DE LA POLLUTION BACTERIENNE

Les eaux usées brutes présentent des charges en coliformes totaux variant de $1,72 \times 10^5$ à $2,20 \times 10^6$ UFC /100 ml avec une valeur moyenne de $1,51 \times 10^6$ UFC/100 ml. Cette charge est du même ordre de grandeur que celle généralement rencontrée dans les effluents urbains [13], [14]. Sur la base de la classification adoptée par [10], cette charge correspond à la composition bactériologique type des effluents bruts d'eaux usées de la catégorie de charge faible à moyenne. Dans l'effluent traité la charge résiduelle en coliformes totaux a varié entre $2,48 \times 10^3$ ufc/100 ml (3,39 ulog) et $8,95 \times 10^4$ ufc/100 ml (4,95 ulog). Ceci correspond à une élimination de l'ordre de 5,23 à 6,32 ulog. Selon les normes de [23], les eaux épurées ne peuvent faire l'objet de réutilisation en irrigation non restrictive que pour des charges en coliformes totaux inférieures à 1000/100ml (3 ulog). Ainsi, les résultats issus de cette étude menée sous climat soudanien restent peu satisfaisants pour l'élimination des coliformes totaux selon cette norme malgré l'abattement maximal de 94,29% durant l'étude. Les résultats de cette étude sont toutefois similaires par rapport à ceux obtenus par [11] sur une filière similaire en climat tropical humide (Colombie). Avec un temps de séjour total de 12 jours, ils rapportent des concentrations résiduelles en coliformes fécaux de l'ordre 3,81 ulog. Des études menées dans plusieurs stations expérimentales en Afrique de l'Ouest montrent des réductions similaires (de 4 à 7 unités logarithmiques) pour des filières de traitement combinant 2 ou 3 bassins de lagunage en série et ayant des temps de séjour supérieurs à 20 jours [28],[29], [20]. Les principaux facteurs identifiés par ces auteurs comme ayant une influence directe sur l'abattement de ces bactéries sont : le rayonnement solaire, le pH et la température de l'eau du bassin. D'autres facteurs tels que la charge en DBO5, les concentrations en oxygène dissous semblent avoir respectivement des effets positifs et négatifs sur la survie des coliformes totaux des bassins de lagunage [30],[18] qui a pourtant travaillé la même filière (comprenant 2 bassins en série) que [31] a observé un faible abattement de 2 unités logarithmiques au 2ie. Ceci montre que pour les mêmes temps de séjours et des charges hydrauliques similaires, l'augmentation de la charge organique influence négativement l'abattement des coliformes totaux.

Dans l'effluent traité à la sortie de la filière, la teneur résiduelle d'*Escherichia Coli* est en moyenne de $1,07 \times 10^3$ CFU/100 ml soit 3,03 ulog, ce qui correspond à un abattement moyen de $1,72 \times 10^3$ CFU/100 ml (5,24 ulog) soit une élimination de 81,33%. La valeur résiduelle obtenue est largement au-dessus des normes de [23] qui fixe la limite de 1000 ufc/100ml pour l'irrigation de légumes (y compris ceux qui sont susceptibles d'être consommés crus). On note qu'à la sortie de la filière les salmonelles sont partiellement éliminées à hauteur de 40% à 50%. Vu ces résultats d'élimination des salmonelles, l'effluent de sortie de la filière ne peut être réutilisés en agriculture de restriction (recommandation de [23] pour la réutilisation Agricole des eaux usées).

5 CONCLUSION

Cette étude a permis de suivre les performances épuratoires d'une filière de trois bassins de lagunages à microphytes sous climat soudanien. Les résultats présentent des rendements épuratoires satisfaisants pour l'élimination des matières en suspension en accord avec les normes de rejet des effluents de lagunage recommandées par l'union européenne pour ce paramètre (< 150 mg/l). L'élimination de la DBO5 reste partielle et les valeurs résiduelles de la DBO5 (50-170 mg/l) sont en grande partie au-dessus des limites des teneurs (< 25 mg/l) recommandées par l'union européenne. L'élimination des nutriments (en azote et en phosphore) est très faible. Les concentrations résiduelles restent très élevées dans l'effluent traité et pourraient constituer un grand risque d'eutrophisation pour des rejets en milieu sensible. Cependant, ils constitueront un apport intéressant de fertilisation en nutriments azotes et phosphores dans le cas d'une réutilisation en agriculture urbaine. L'abattement de la pollution bactérienne n'est pas satisfaisant. La charge résiduelle moyenne en coliformes totaux dans l'effluent traité reste encore élevée par rapport à la norme OMS pour une irrigation non restrictive.

REFERENCES

- [1] Kôkôh Rose EFFEBI, Lagunage anaérobie : modélisation combinant la décantation primaire et la dégradation anaérobie. Thèse de doctorat : Université de Liège Campus d'ARLON, Département Sciences et Gestion de l'Environnement. 235 p, 2009
- [2] Maïga A.H., Konate Y., Wethe J., Denyigba K., Zougrana D. et Togola L., Performances épuratoires d'une filière de trois étages de bassins de lagunage à microphytes sous climat sahélien : cas de la station de traitement des eaux usées de l'EIER. *Sud Sciences & Technologies*, n° 14. 9p, 2006
- [3] CIEH (Comité Inter-Africain d'études Hydrauliques), "Etude comparative des systèmes d'épuration collectifs dans le contexte africain". CIEH; Ouagadougou. 66 p, 1993
- [4] Koné D., Epuration des eaux usées par lagunage à microphytes et à macrophytes en Afrique de l'ouest et du centre: état des lieux, performances épuratoires et critères de dimensionnement. Thèse de Doctorat/École Polytechnique Fédérale de Lausanne. 194 p, 2002
- [5] Abdoulaye. A., Oyédé, Un site urbain de l'Afrique tropicale confronté aux contraintes naturelles et anthropiques : le cas de la ville de Parakou au Bénin. *Revue BenGéO*, N°5, Département de Géographie, UAC, 16 p, 2009
- [6] INSAE, Analysis of the results of the RGPH: population projections and prospective study of social demand in Benin, Cotonou, Benin, 113p, 2013
- [7] ASECNA, Journal des pluies maximales journalières de la station synoptique de Parakou, Bénin 2014.
- [8] Saggat M.M. and Pescod M.B., Modelling the performance of anaerobic wastewater stabilization ponds. *Wat. Sci. Techn.* H.W. Pearson and F.B Green (Editors), 31.pp. 171-183, 1995
- [9] Radoux M., "Epuration des eaux usées par Hydrogène reconstituée." *Tribune de l'eau* 42(8): 62-68, 1995
- [10] Metcalf et Eddy, Inc., *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 3rd ed., McGraw-Hill International Editions, New York, USA. 15p, 1991
- [11] Madera C.A., Pena M.R., and Mara D.D, Microbiological quality of a waste stabilization pond effluent used for restricted irrigation in Valle Del Cauca, Colombia. *Wat. Sci. Tech.*, 45 (1), pp139-143, 2002
- [12] Henze DA, Cameron WE, Barrionuevo G. Dendritic morphology and its effects on the amplitude and rise-time of synaptic signals in hippocampal CA3 pyramidal cells. *J Comp Neurol.* 369:331-344, 1996
- [13] Lazarova V., Savoye P., Janex M.L., Blatchley E.R and Pommepay M, Advance wastewater Disinfection technologies: State of the art and perspectives. *Recycling and reuse. 2° International conference. Resources and Environmental: Priorities and challenge.* 14-16 September, Milan, Italy, 354-362, 1998
- [14] Nigim H.H., Hashlamoun W.A., Aldadah J.Y., and Vassel J.L., Potential implication of subsurface drip irrigation with primary treated wastewater. *WA regional symposium on water recycling in Mediterranean region.* Iraklio, Greece, 26-29 September. Preprint Book 2: 171-174. 2002

- [15] Council of the European Communities Council Directive 91/271/EEC concerning urban wastewater treatment. Official Journal of the European Communities L135, 40-52, 1991 http://www.europa.eu.int/comm/environment/water/urban_waste/directiv.html (30 May, 1991)
- [16] Menguele J-C., Contribution à l'analyse critique du dimensionnement de la station de traitement des eaux usées de l'EIER. Analyse des performances de la filière bassin facultatif – bassin de maturation. Rapport de recherche, EIER/GS, Ouagadougou, 20p, 1990
- [17] Darriulat C, Bassins de stabilisation en climat sahélien : comportement physico-chimique et description de la biomasse pour une charge donnée. Travail pratique de diplôme. Travail de diplôme / EPFL; Lausanne, 1991
- [18] Klutsé A., Epuration des eaux usées domestiques par lagunage en zone soudano sahélienne (Ouagadougou, Burkina Faso). These de Doctorat, Université Montpellier II. 160 p, 1995
- [19] Laouali G., Delisle C. E., Vincent G., Couillard D. and Laouali S., "Experimental study of wastewater treatment by facultative ponds and free hydrophytes in Niger." *Water Quality Research Journal of Canada* 31(1): 37-50, 1996
- [20] Laouali S.M. et Idder T, Expériences pilote (Aquadev- UAM Niamey) de traitement des eaux usées urbaines par lagunage Séminaire International sur l'Assainissement Urbain en Afrique, Dakar-Gorée, 18-12, 2000
- [21] Koné D., Cissé G., Seignez C. and Holliger C, "Le lagunage à laitue d'eau (*Pistia stratiotes*) à Ouagadougou : une alternative pour l'épuration des eaux usées domestiques destinées à l'irrigation." *Cahiers Agricultures* 11: 39-43, 2002
- [22] Ayers R.S. and Westcott, D.W., *Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29.* United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, 1985
- [23] OMS, Lignes directrices pour un usage sûr des eaux usées et des excréta en agriculture et en aquaculture. Genève. Organisation Mondiale de la Santé. 3.3. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 19. No. 12. pp. 61-64, 1989
- [24] Brix H., "Functions of Macrophytes in Constructed Wetlands." *Water Science and Technology* 29(4): 71-78, 1994
- [25] Brix H., "Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?" *Water Science and Technology* 35(5): 11-17, 1997
- [26] Reddy K.R. and d'Angelo E.M., Biochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands. 5th Proc Internl Conf. Wetland Systems for Water Pollution Control, Vienna, keynote Address 1, pp. 1-21, 1996
- [27] Reddy K. R., Agami M. and Tucker J. C. "Influence of nitrogen supply rates on growth and nutrient storage by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) plants." *Aquat. Bot.* 36(1): 33-43, 1989
- [28] Guène O. and Touré, C. S., "Fonctionnement du lagunage naturel au Sahel." *La Tribune de l'eau* 44 (552): 31-42, 1991
- [29] Niang S., Diop B. S., Mbeguere M. and Radoux M., "Urban wastewater purification by natural epuration systems in Sahel countries: The experimental plant of Camberene (Dakar-Senegal)." *Vecteur Environnement* 29(5): 31-36, 1996
- [30] Bahlaoui M., Lagunage à haut-rendement expérimental: Dynamique de différents groupes bactériens et performances épuratrices sanitaires. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, Montpellier. 164 p, 1990
- [31] Guène O., Contribution à l'étude du fonctionnement et de la modélisation de l'épuration de la pollution carbonée et microbienne des lagunes naturelles sous climat sahélien : cas de la STEP pilote de l'EIER. Rapport de recherche pour le cycle d'études post grades en Ingénierie de l'environnement EPFL Lausanne. Novembre, 65 pages, 1989.