

POTENTIEL DES BIOCHARS À BASE DE RÉSIDUS AGRICOLES POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES DOMESTIQUES PAR FILTRES À FLUX VERTICAUX PLANTÉS DE *Echinochloa pyramidalis*

POTENTIAL OF BIOCHARS FROM AGRICULTURAL RESIDUES IN DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT USING VERTICAL FLOW FILTERS VEGETATED WITH *Echinochloa pyramidalis*.

*DJOUSSE KANOOU Boris Merlain¹, DJIOKENG NGUIFFO Francine Cybelle¹, LEKEUFACK Martin², VISIY Edna Buhnuy³, MOUAFFO TSAGUE Sibelle¹, MELI LONTSI Gilles Raoul⁴

¹ Unité de recherche en gestion de l'eau, Département du Génie Rural, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles (FASA), Université de Dschang (Uds), B.P. 222 Dschang, Cameroun

² Unité de recherche en botanique appliquée, Département de Biologie végétale, Faculté de Sciences, Université de Dschang (Uds), B.P. 222 Dschang, Cameroun

³ Pan African University, Life and Earth Sciences Institute (Including Health and Agriculture), P.M.B 20, Iba-dan, Nigeria.

⁴ Unité de recherche en sciences du sol et de l'environnement, Département de sciences du sol, Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles (FASA), Université de Dschang (Uds), B.P. 222 Dschang, Cameroun.

*Auteur correspondant (corresponding author) : djoussemerlain@gmail.com

RESUME

Le traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés est proposé comme une alternative adaptée aux conditions socio-économiques des pays en voie de développement. L'utilisation du biochar dans ces filtres en substitution partielle ou totale des massifs filtrants classiques était au centre de la présente étude. L'efficacité épuratoire de trois biochars produits à partir de chacun des trois résidus végétaux (les rafles de maïs, les coques de noix de coco, et les coques de noix de palmiste) pour l'amélioration des performances épuratoires des filtres à flux vertical plantés de roseaux a été étudiée ici. Le dispositif expérimental était constitué de trois filtres à biochars répliqués trois fois et de trois filtres témoins alimentés à 142 l/m²/jr. Les caractéristiques physico-chimiques des eaux ont été mesurées à 30 puis 60 jours depuis le début de l'essai ; les paramètres physiques de croissance des plantes mesurées toutes les semaines entre le 30^e et le 60^e jour soit 4 fois. Les résultats révèlent une augmentation du pH, une amélioration de la réduction de la teneur en azote, fer, phosphore et des micro-organismes pathogènes dans les filtres à biochar comparé aux filtres à sable classiques. Globalement, le filtre avec biochar de rafles de maïs a permis d'obtenir de meilleurs résultats au bout de deux mois. Il reste opportun pour les prochaines études de faire le suivi des paramètres sur une plus longue durée et de tester l'effet de la combinaison des trois biochars.

MOTS-CLES : eaux usées domestiques, biochar, filtres plantés

ABSTRACT

The treatment of domestic wastewater by vegetated filters is proposed as an alternative better suited to the socio-economic conditions of developing countries. The use of biochar in these filters in partial or total substitution of conventional filter substrate was the main aim of the present study. The effectiveness of three biochars produced from three crop wastes (Corn cobs, coconut shells and palm nut shells) in improving the purification performance of vertical flow filters vegetated with antelope grass was studied. The experimental set-up consisted of three biochar filters plus a control replicated thrice. The filters were supplied at a hydraulic loading rate of 142 l/m²/day. The physico-chemical characteristics of the water were measured at 30 and then 60 days from the beginning of the test; the physical growth parameters of randomly selected plants were measured weekly between the 30th and the 60th day, i.e. 4 times. The results reveal an increase in pH, an improvement in the reduction of nitrogen, iron, phosphorus, and pathogenic micro-organisms content in the effluents from biochar filters compared to those from conventional sand filters. Overall, the corn cob biochar filter showed better results after two months. It remains important for future studies to monitor the parameters over a longer period and to test the effect of the combination of the three biochars in one filter.

KEYWORDS: domestic wastewater, biochar, vegetated filters

1. INTRODUCTION

La forte croissance démographique couplée à une urbanisation non contrôlée s'accompagne inévitablement de la production des volumes importants de déchets solides et liquides au rang desquelles les eaux usées domestiques (Zulfiqar et al., 2019). Le rejet non contrôlé de ces déchets dans la nature entraîne inévitablement la dégradation de l'environnement et des ressources de plus en plus limitées. Face à cette situation alarmante, il est important de bien traiter les eaux usées domestiques avant de les rejeter dans l'environnement afin d'éviter la pollution des ressources en eau de plus en plus limitées et les maladies hydriques. D'après EME (2012), les filtres plantés de macrophytes sont reconnus aujourd'hui comme des procédés de traitement des eaux usées domestiques adaptés au contexte urbain des pays en développement. Ils peuvent être à écoulement vertical ou horizontal. Le modèle à écoulement vertical, modèle français, a la particularité d'appliquer des eaux brutes sur le filtre, s'affranchissant d'une étape préalable de traitement (EME, 2012). Ce principe de traitement où les processus biologiques sont majoritaires est adapté à un type de pollution organique mais présente de faibles capacités à éliminer les polluants chimiques du fait des faibles capacités d'adsorption des matériaux constituants le massif filtrant (Dalameh, 2016). Cela dit, la qualité chimique des effluents issus de ces filtres reste donc inappropriée. Ces résultats mitigés indiquent la nécessité d'optimiser leur efficacité épuratoire. Le biochar, produit issu de la pyrolyse des résidus agricoles, forestiers et déchets municipaux attire de plus en plus l'attention des chercheurs ces dernières années en raison de sa multifonctionnalité (Ghizlane et al., 2020). Le biochar à travers ses propriétés particulières telles que sa teneur en carbone, sa grande surface spécifique, sa structure hautement poreuse et stable, sa grande capacité d'échange cationique et anionique et ses groupes fonctionnels (Rizwan et al., 2016), a la capacité d'adsorber différents polluants de l'eau tels que les agents pathogènes (Kaetz et al., 2020) ; les polluants inorganiques comme les métaux lourds (Yang et al., 2019) et les polluants organiques (Park et al., 2019). Au regard de ces effets bénéfiques rapportés, il serait intéressant d'évaluer l'aptitude des biochars produits à partir des résidus végétaux disponibles localement, à améliorer l'efficacité des filtres plantés à écoulement vertical. La présente étude visait donc principalement à améliorer l'efficacité de ces filtres lorsqu'utilisés pour le traitement des eaux usées domestiques. Il s'agissait plus spécifiquement de concevoir et mettre en place des filtres à biochar plantés de roseaux, de déterminer l'effet de 3 biochars produits à partir de trois résidus végétaux

différents (rafles de maïs, coques de noix de coco, coques de noix de palmiste), sur les performances épuratoires des filtres et enfin, de déterminer l'effet du biochar sur les paramètres de croissance des macrophytes dans les filtres.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

Cette étude a été menée à la station expérimentale d'épuration des eaux usées de l'Université de Dschang, entre 5°25' et 5°30' de Latitude Nord et entre 10° et 10°5' de longitude Est. La station reçoit l'eau usée domestique prétraitée qui provient de la cité universitaire à un débit de ~3 m³/jour. L'eau usée utilisée pour étude a été collectée dans le bassin d'égalisation de la station de traitement existante, après avoir subi un traitement primaire. La station d'épuration est ouverte à la nature et reçoit donc l'eau de pluie qui tombe directement sur les filtres pendant la saison des pluies.

2.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était constitué de trois traitements (3 filtres avec 3 biochars différents) répliqués chacun 3 fois. En complément, 3 témoins (filtres classiques sans biochar) ont été mis en place, ce qui représente 12 filtres au total.

Les biochars utilisés ont été obtenus par pyrolyse lente de trois résidus végétaux à savoir : les rafles de maïs, les coques de noix de coco, et les coques de noix de palmiste. La Figure 1 en présente des photographies.

Ces résidus agricoles ont été choisis en raison de leur disponibilité locale en grande quantité. Il est à noter que les coques de noix de palmiste posent un problème sanitaire dans les zones de grande production et une valorisation permettra de résoudre ce problème. Après production, les biochars ont été broyés et tamisés à une granulométrie comprise entre 0,25 et 2,00 mm. Cette granulométrie a été choisie suivant les granulométries de la couche filtrante du second étage des filtres plantés à écoulement vertical (Molle et al., 2005). La granulométrie comprise entre 0,25 mm et 1 mm a été utilisée pour le sable. Pour ce qui est du gravier, deux granulométries ont été utilisées à savoir : celle comprise entre 2 mm et 12 mm et celle comprise entre 10 et 20 mm (Morand, 2007).

Le massif filtrant était fait à l'image de celui des filtres à sable lent (les trois filtres témoin). Dans chacun des neuf autres filtres, une partie du sable fin a été substituée par le biochar (Figure 2). Leur caractérisation a été faite suivant les méthodes proposées par Pauwels et collaborateurs (Pauwels et al., 1992).



Figure 1 : Photographies des 3 biochars broyés et tamisés à une granulométrie comprise entre 0,25 et 2,00 mm
De gauche à droite : biochars de noix de coco, de coques de noix de palmiste et de rafles

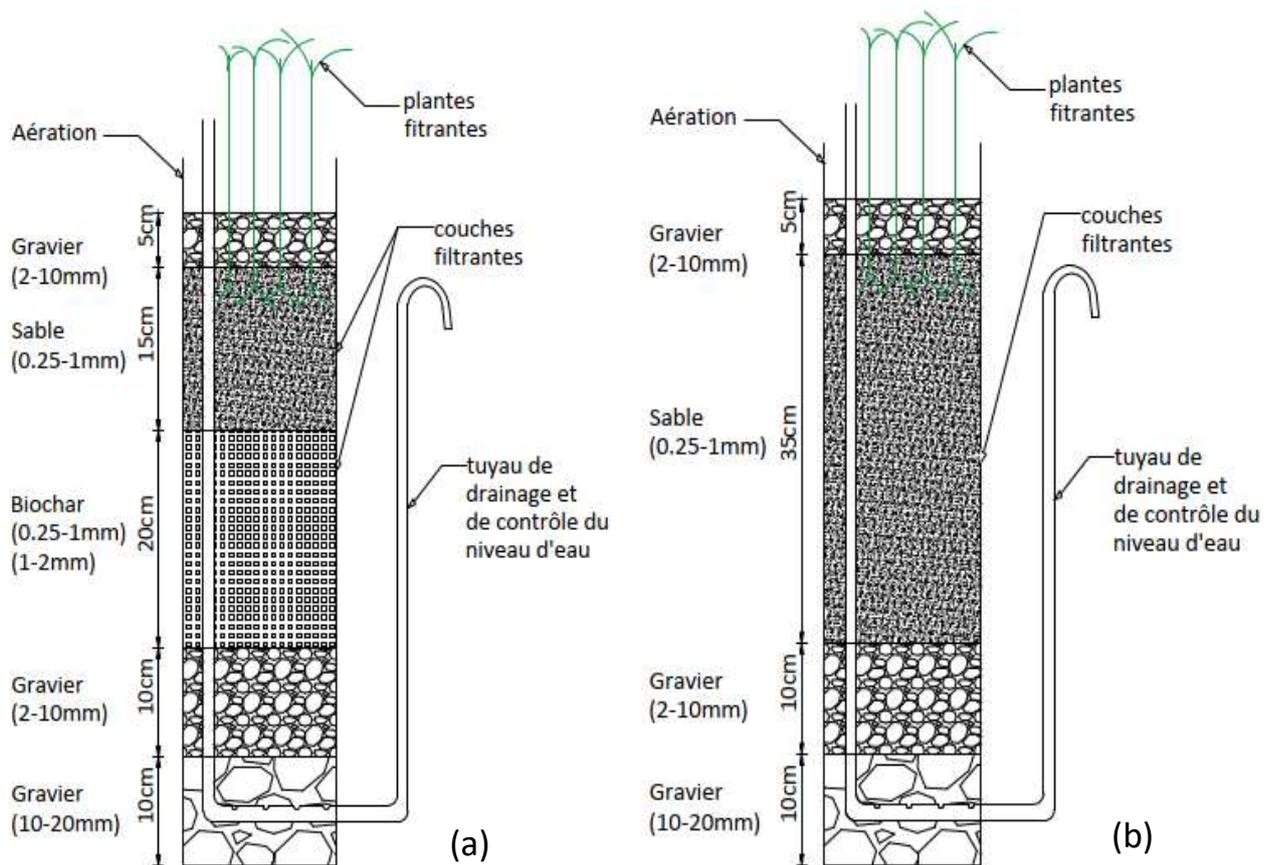


Figure 2 : Coupe longitudinale des filtres (filtre à biochar (a) et filtre à sable (b))

Les filtres étaient alimentés par trois grandes bassines de 50 litres disposées sur une table afin de faciliter l'alimentation par gravité des filtres (Figure 3).



Figure 3 : Photos des dispositifs expérimentaux : Filtre à biochar en haut, filtre à sable en bas

L'espèce *Echinochloa pyramidalis* (communément appelée roseau) a été choisie pour les essais compte tenu de son efficacité épuratoire reportée dans les travaux précédents (Fonkou et al., 2010), et de sa disponibilité dans la zone d'étude. De jeunes pousses d'une hauteur moyenne de 21 ± 5 cm et possédant entre 2 et 5 feuilles avec un système racinaire long de 5 ± 3 cm, ont été prélevées à l'aide d'une machette, caractérisées et repiquées dans les filtres le même jour à raison de 6 plants par filtre soit une densité de 85 plants au m^2 .

2.3. Mise en place des filtres

Les matériaux filtrants ont été introduits dans les filtres sur une épaisseur de 60 cm en couches successives selon l'ordre suivant (Figure 2) :

- i) 10 cm de gravier de granulométrie comprise entre 10 et 20 mm (couche drainante) ;
- ii) 10 cm de gravillon de granulométrie 2 à 10 mm servant de couche de transition ;
- iii) Grille de séparation de maille 1 mm pour éviter la migration du biochar dans le gravier ;
- iv) Biochar de granulométrie 1 mm à 2 mm et 0,25 mm à 1 mm successivement dans les filtres devant recevoir du biochar, sur une épaisseur de 20 cm ;
- v) Grille de séparation des couches de biochar et de sable ;
- vi) Sable fin (de granulométrie 0,25 à 1 mm) sur 15 cm d'épaisseur. Notons que les couches de biochar et de sable constituent la couche de filtration. Dans les filtres témoins, la couche de filtration est uniquement constituée de sable fin (sur une épaisseur de 35 cm) ;
- vii) Au-dessus de la couche filtrante, une couche de gravier de granulométrie 2 à 10 mm et d'épaisseur 2 cm a été introduite pour recevoir de l'eau brute et assurer une répartition uniforme sur la surface du filtre.

Une fois les différentes couches constituant le massif filtrant disposées, les filtres ont été saturés en eau et six jeunes pousses d'*Echinochloa pyramidalis* ont été plantées à la surface de chaque filtre. La saturation a été maintenue pendant l'acclimatation des jeunes plants en maintenant en position verticale les tuyaux de sortie d'eau du filtre à la hauteur du substrat dans le filtre. Une fois les plantes acclimatées, ces tuyaux ont été abaissés et maintenus à une hauteur de 40 cm (limite supérieure de la couche de biochar). Ceci permettait d'avoir à la fois des conditions aérobies et anoxiques, nécessaires à l'épuration des eaux.

Les différents filtres ont été alimentés en continu avec des eaux usées domestiques prétraitées, à une charge hydraulique de 142 L par m^2 et par jour. La Figure 2 présente la coupe longitudinale des filtres utilisés. La différence entre les filtres à charbon et les filtres témoins se situe au niveau de la couche de filtration, constituée de 58 % de biochar et 42 % de sable dans les filtres à biochar et de 100% de sable dans les filtres témoins à sable. La figure 3 présente le dispositif après 30 jours et 60 jours de fonctionnement.

2.4. Suivi des paramètres physicochimiques et microbiologiques

Les performances d'épuration des filtres ont été déterminées en suivant les paramètres physicochimiques et microbiologiques de l'eau avant et après traitement par analyse des échantillons obtenus à l'entrée et à la sortie de chacun des douze filtres. Deux échantillonnages ont été analysés : le premier après 30 jours de fonctionnement et le

second après que la végétation se soit bien développée (60 jours), Les échantillons ont été prélevés dans la matinée à la sortie de chaque filtre dans des bouteilles en verre borosilicaté de 0,4 L préalablement stérilisées à l'autoclave à 115° C pendant 15 minutes et transportés dans une glacière à 4°C au laboratoire pour analyse. En laboratoire, les paramètres physicochimiques ont été mesurés suivant les méthodes décrites par Hach (Hach, 2004) pour l'analyse des eaux et eaux usées. Les paramètres mesurés comprenaient : le pH, la turbidité, la conductivité électrique (CE), la demande biochimique en oxygène (DBO₅), la demande chimique en oxygène (DCO), l'azote total, les nitrates, les nitrites, bases échangeables (Fe²⁺, Ca²⁺), les phosphates (PO₄³⁻), les coliformes totaux (CT) les coliformes fécaux (FC), les salmonelles, les shigelles, les staphylocoques, les streptocoques et les vibrions. Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre Eutech Instruments CyberScan 1500. La turbidité a été mesurée à partir d'un turbidimètre DRT 100B et la conductivité électrique (EC) a été mesurée à l'aide du compteur de conductivité/TDS Hach 44600 vintage. L'azote total, les nitrites, les nitrates, les phosphates et la DCO ont été mesurés avec un spectrophotomètre Hach DR/2500. La valeur de DBO₅ a été mesurée à l'aide d'un DBOmètre numérique de marque VELP SCIENTIFICA dans un incubateur à 20°C pendant 5 jours. L'azote a été déterminée par la méthode Kjeldahl. Les méthodes suivantes ont été utilisées pour la détermination des paramètres microbiologiques : la méthode de filtration sur membrane pour les coliformes totaux, coliformes fécaux ; la méthode de CHAPMAN pour les staphylocoques ; la méthode par tubes multiples pour les salmonelles ; La méthode du NPP (nombre le plus probable) pour les vibrions (APHA,1998). Ces paramètres ont été choisis sur la base des données de la littérature.

2.5. Evaluation du comportement des plantes épuratrices

Une fois la végétation bien acclimatée et en pleine croissance (30 jours après le repiquage), cinq plantes ont été choisies au hasard par filtres et étiquetées et les mesures suivantes effectuées sur chacune d'elles : la hauteur de la plante, la longueur de la plus longue feuille, le nombre de feuilles et le diamètre au collet. Les mesures ont été effectuées à intervalle de deux semaines jusqu'à la fin de l'expérience sur les mêmes plants, soit 5 séries de mesures.

2.6. Analyses statistiques

Les données collectées ont été analysées avec le logiciel Genstat version 9.0. L'ANOVA unidirectionnelle a été utilisée pour comparer les

valeurs moyennes des paramètres obtenues dans les différents filtres testés. Le test de Tukey a été utilisé pour la comparaison post hoc. Les tests de Kolmogorov-Smirnov et le test de Shapiro-Wilk ont permis de vérifier la normalité des données avant la réalisation de l'ANOVA.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractérisation des substrats

Les trois types de biochar et le sable ont été analysés avant l'expérience. Le tableau 1 présente les résultats obtenus. Il en ressort que le biochar de rafles de maïs est plus riche en éléments chimiques que les autres substrats. Ceci est probablement dû à la composition initiale du résidu (Djousse et al. 2019).

Tableau 1 : Caractéristiques des substrats utilisés

Paramètres (mg/kg sauf autre indication)	Biochar			Sable
	Rafles de maïs	Coques de noix de coco	Coques de noix de palmiste	
pH (unités pH)	9,6	9,3	7,2	7,1
Conductivité (µS/cm)	4,0	1,4	0,2	0,0
Azote total	0,6	0,5	0,2	0,1
N-nitrates	0,1	0,8	0,1	0,1
N- nitrite	0,1	0,1	0,0	0,1
Phosphore total	24,0	24,0	12,0	18,0
Fer	7,1	6,6	5,8	4,5
Potassium	2044	5427	1530	330
Calcium	368	256	224	32
Sodium	1308	620	177	69
Cendres (%)	9,9	10,0	20,0	/
Matière organique (%)	90,0	96,7	80,0	1,7
Carbone organique (%)	45,0	48,3	50,0	0,8

3.2. Comparaison des performances des filtres

3.2.1. Paramètres physiques

Pour l'ensemble des filtres, l'observation visuelle des effluents après traitement a montré qu'ils étaient plus clairs que les eaux usées avant traitement. Le Tableau 2 compare les résultats moyens obtenus sur les paramètres physiques avec les filtres charbon et le filtre à sable. Les résultats de l'ANOVA sur les paramètres physiques des effluents montrent que les traitements n'ont pas eu d'effet significatif sur le pH de l'eau brute après 30 et 60 jours de traitement. Toutefois, une augmentation générale est observée dans les filtres avec biochar avec le temps, par rapport aux filtres à sable qui n'ont entraîné aucune variation. Le biochar de rafles de maïs étant celui

dont le degré d'augmentation a été le plus important (de 0,77 unités à 60 jours). Ceci peut s'expliquer par la libération des bases fortement contenues dans ce biochar étant donné son pH initialement élevé.

Tableau 2 : Comparaison des valeurs moyennes des paramètres physiques en entrée et en sortie des filtres

Point et temps d'échantillonnage	pH	Turbidité (NTU)	Conductivité (mS/cm)
Eau brute entrée	30 j	8,0±0,1 ^a	67,1±0 ^a
	60 j	7,5±0 ^a	179,8±0 ^c
Sortie biochar de rafles	30 j	8±0,1 ^a	46,3±0,4 ^a
	60 j	8,3±0,3 ^a	10,2±0,2 ^a
Sortie biochar de coco	30 j	8±0,2 ^a	43,4±0,4 ^a
	60 j	8,0±0,1 ^a	21,7±0,1 ^a
Sortie biochar de palme	30 j	8±0,1 ^a	42,9±0,4 ^a
	60 j	7,7±0,4 ^a	14,8±0,4 ^a
Sortie témoin	30 j	8±0,1 ^a	53,6±0,3 ^a
	60 j	7,5±0,2 ^a	51,4±0,2 ^b

a, b : Dans chaque colonne, les valeurs identifiées par une même lettre sont statistiquement identiques au seuil de 5%

Ces résultats corroborent ceux de Visiy et al. (2022) qui ont aussi observé une augmentation du pH dans les filtres à biochar par rapport aux filtres à sables mais pas une différence significative au seuil de 5%. La turbidité a été significativement réduite ($P < 0,001$) pour tous les filtres après 60 jours, les filtres à biochar étant plus performants (avec des rendements de 94,4 %, 91,8 % et 87,9 % respectivement du biochar de rafles de maïs, de coques de palme et de coque de coco contre 71,4% au niveau du sable). Ce résultat se rapproche de celui obtenu par Korbinian et al. (2018) qui rapporte une réduction plus importante de la turbidité de l'eau usée dans les filtres à biochar (93 %) par rapport aux filtres à sable (87 %). La conductivité a également été significativement réduite par tous les filtres à 60 jours de traitement ($p < 0,005$) avec des performances statistiquement identiques. Les ions solubles responsables de la conductivité de l'eau sont progressivement retenus à la surface des substrats et consommés par les microorganismes présents pour leurs activités biologiques. La réduction de la conductivité à 60 jours pourrait également être attribuée à la forte croissance des plantes. La croissance des plantes dans les filtres plantés est connue pour diminuer la concentration de solides dissous et par conséquent la conductivité électrique.

3.2.2. Paramètres chimiques

a) Pollution organique (DCO et DBO)

Globalement, tous les traitements ont eu en 30 comme en 60 jours un effet significatif ($p < 0,01$) sur la DCO et la DBO₅ de l'eau usée. Les résultats moyens sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Comparaison des valeurs moyennes des paramètres chimiques (DCO et DBO) en entrée et en sortie des filtres

Point d'échantillonnage	DCO (mg O ₂ / L)		DBO ₅ (mg O ₂ / L)	
	30 j	60 j	30 j	60 j
Eau brute entrée	9830 ^c	1600 ^b	377 ^b	319 ^b
Sortie biochar de rafles	9670±1 ^c	3439±1 ^a	125±2 ^a	93±1 ^a
Sortie biochar de coco	1911±1 ^a	1905±2 ^a	154±1 ^a	107±1 ^a
Sortie biochar de palme	6109±1 ^b	2564±1 ^a	116±1 ^a	88±1 ^a
Sortie témoin	8102±1 ^c	4818±2 ^a	131±2 ^a	128±2 ^a

a, b, c : Dans chaque colonne, les valeurs identifiées par une même lettre sont statistiquement identiques au seuil de 5%

La DCO a été significativement réduite ($P < 0,01$) par tous les filtres après 60 jours de traitement sans différences statistiquement significatives. Globalement, les filtres à biochar de noix de coco ont été les plus performants durant toute la période de traitement avec des rendements de 65,3 % et 91,6 % de réduction respectivement après 30 et 60 jours de traitement contre 11,6 % et 62,7 % dans les filtres à sable. Ce résultat corrobore ceux de Zhou et al. (2017) ont obtenu des rendements de 94,4 % et 80,0 % respectivement pour les filtres à biochar et sable après 90 jours. Kaetzel et al. (2020) ont eu des rendements de 74 % et 61 % et de Korbinian et al. (2018) ont obtenus des rendements de 87 % et 74 % respectivement des filtres à biochar et à sable à l'issue du traitement des eaux usées domestiques. Pour ce qui est de la DBO₅, les performances des filtres à biochar ont été statistiquement identiques à celles des filtres à sable pour les deux séries de mesure. Toutefois, les filtres à biochar ont présenté des rendements plus importants. Le biochar de noix de palme a été le plus performant avec des rendements de 69,0 % et 76,5 % contre 63,3 % et 62,4 % des filtres à sable après 30 et 60 jours. Comme dans cette étude, Dalahmeh (2016) a débouché sur une performance meilleure des filtres à biochar de bois (98 % de réduction) par rapport aux filtres à sable (70 % de réduction) dans la réduction de la DBO₅ des eaux usées, avec une charge hydraulique de 37 litres/m²/jr sur une période de 120 jours. La matière organique particulaire et dissoute de l'eau usée peut être épurée par plusieurs mécanismes tels que l'adsorption, la filtration, l'oxydation chimique, l'hydrolyse et l'assimilation biologique par les microorganismes. L'efficacité des filtres dans la réduction de la charge polluante organique varie en fonction des caractéristiques du substrat qui y est contenu à l'instar de la surface spécifique et de l'habilité à promouvoir le développement du biofilm (Kaetzel et al., 2019). Les biochars utilisés dans cette étude étaient plus riches en cendres et en minéraux que le sable (Tableau 1). Ainsi, le biofilm responsable de la réduction de la pollution organique se serait

rapidement développé dans les filtres à biochar en se nourrissant des éléments nutritifs présents, d'où les meilleures performances. En outre, la structure poreuse du biochar et sa grande surface spécifique rapportées par de nombreux auteurs favoriseraient l'adsorption de certains composés organiques et la colonisation rapide du substrat par le biofilm (Kadlec et Wallace, 2008) plus importante comparée aux filtres à sable.

b) Azote total, nitrates et nitrites

Les résultats moyens, présentés dans le Tableau 4, montrent une bonne efficacité d'élimination de l'azote dans tous les traitements notamment en 60 jours de traitement.

Tableau 4 : Comparaison des performances d'épuration de l'azote dans les filtres à charbon et le filtre témoin

	N total (mg/l)		N – NO ₃ ⁻ (mg/l)		N – NO ₂ ⁻ (mg/l)	
	30 j	60 j	30 j	60 j	30 j	60 j
Entrée	37,7±0 ^d	12,0 ^b	0,26 ^a	0,10 ^d	0,19 ^a	0,07 ^d
Sortie rafles	26,5±0,4 ^b	5,3±0,8 ^a	0,26±0,01 ^a	0,05±0,00 ^b	0,19±0,01 ^a	0,04±0,001 ^b
Sortie coco	33,1±1,2 ^c	5,8±0,9 ^a	0,28±0,01 ^a	0,04±0,00 ^a	0,21±0,01 ^a	0,03±0,001 ^a
Sortie palme	17,9±0,3 ^a	6,7±0,5 ^a	0,29±0,01 ^a	0,05±0,00 ^b	0,21±0,01 ^a	0,04±0,001 ^b
Sortie témoin	32,6±0,6 ^c	4,7±0,5 ^a	0,26±0,01 ^a	0,04±0,00 ^a	0,19±0,01 ^a	0,03±0,001 ^a

a, b, c : Dans chaque colonne, les valeurs identifiées par une même lettre sont statistiquement identiques au seuil de 5%

Les performances des filtres à biochar de noix de palme et de rafles de maïs sont les meilleures avec des rendements de 52,7 % et 29,7 %. Les filtres à sable (témoins) ont des efficacités (13,6 %) statistiquement plus faibles que celles des filtres à sable. Plusieurs auteurs ont rapporté un résultat similaire dans la réduction de l'azote total. Zhou et al. (2017) ont obtenu des rendements de 52,7 % dans des expériences réalisées avec des filtres plantés à biochar de bambous contre 29,9 % pour les filtres à sable en 90 jours de traitement. Dalahmeh (2016) a obtenu des rendements de 50 % et 5 % respectivement sur des filtres à biochar et à sable. Ces rendements sont plus faibles que ceux observés dans notre étude. Ceci peut s'expliquer par les caractéristiques différentes des biochars mais aussi à notre durée d'essai plus courte. La réduction de l'azote total peut se faire par adsorption, assimilation biologique par le biofilm, nitrification et dénitrification. Ces processus seraient plus importants dans les filtres à biochar à raison des conditions qui y sont plus favorables (Xiang et al., 2020 ; Kamali et al., 2021 ; Shahraki et al., 2022).

c) Phosphates et fer

Le tableau 5 rassemble les résultats moyens des analyses de phosphates et de fer en entrée et en sortie des filtres à charbon et des témoins.

Tableau 5 : Comparaison des performances d'épuration des phosphates et du fer dans les filtres à charbon et le filtre témoin à 30 et 60 jours

	Fe ²⁺ (mg/l)		Phosphate (mg/l)	
	30 j	60 j	30 j	60 j
Entrée	14,31 ^c	14,31 ^c	52,7 ^d	52,7 ^d
Sortie rafles	11,51±0,1 ^{bc}	0,002±0,001 ^a	15,5±0,1 ^c	15,8±0,1 ^a
Sortie coco	11±0,1 ^{bc}	0,003±0,001 ^a	23,6±0,1 ^a	17,4±0,1 ^b
Sortie palme	6,61±0,1 ^a	0,002±0,001 ^a	36,6±0,2 ^b	22,6±0,1 ^b
Sortie témoin	10,36±0,1 ^{bc}	0,200±0,01 ^b	12,7±0,1 ^c	23,1±0,1 ^c

a, b, c : Dans chaque colonne, les valeurs identifiées par une même lettre sont statistiquement identiques au seuil de 5%

On peut constater qu'en 30 jours de traitement, les filtres à biochar de coques de palme ont été les plus performants dans la réduction de la concentration en fer (39,6 % contre 17,5 % et 15,7 % respectivement dans les filtres à biochar de rafles de maïs ou à biochar de noix de coco et 27,6% dans le filtre témoin. Après 60 jours, les filtres à biochar ont été statistiquement plus performants que les filtres à sable, avec des rendements d'élimination du fer de 99,9 % avec les filtres à biochars de rafles de maïs et de coques de noix coco, 99,0% avec les filtres à biochar de coques de palme et 84,7 % avec le filtre témoin à sable. Ayesha et al. (2017) rapportent un résultat similaire sur l'efficacité des filtres plantés à biochar (avec un rendement de 90 %) dans la réduction de la concentration en métaux lourds (Fe, Zn, Cu, Ni) des eaux usées. Pour ce qui est des phosphates, les filtres à biochar ont été significativement plus performants que les filtres à sable en 60 jours de traitement. Des rendements de 75,3 % ; 68,7% et 61,9% ont été observés avec respectivement le biochar de rafles de maïs, de coques de coco et de coques de palmiste contre un rendement de 41,2% des filtres à sable uniquement. L'adsorption est le principal mécanisme de traitement des phosphates dans les filtres. La capacité d'un substrat à retenir le phosphore dépend de son pH, de sa concentration en minéraux (Ca²⁺, Fe²⁺, Mg²⁺, Al³⁺) et de sa surface spécifique (Pignatello, 2011), ce qui explique probablement la meilleure performance des filtres à biochar.

3.2.3. Paramètres microbiologiques

Les résultats du suivi des paramètres microbiologiques sont donnés au Tableau 6.

Tableau 6 : Comparaison des performances d'abattement des paramètres microbiologiques dans les filtres à charbon et le filtre témoin

	Coliformes totaux		Coliformes fécaux		Salmonelles		Shigella		Staphylocoques		Streptocoques		Vibron	
	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs	30jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs	30jrs	50 jrs
Entrée	3000 ^c	7000 ^b	1800 ^b	5500 ^b	1800 ^d	4500 ^c	500 ^d	1000 ^c	600 ^c	4000 ^d	2800 ^d	1500 ^b	480 ^c	1000 ^c
Sortie rafles	840±1 ^a	1248±2 ^a	689±1 ^a	857±2 ^a	700±0 ^a	776±1 ^a	59±1 ^a	129±1,4 ^a	400±0 ^b	0±0 ^a	1001±1 ^a	102±2 ^a	29±0,8 ^a	29±1,4 ^a
Sortie coco	1500±1 ^{ab}	1748±2 ^a	1099±1 ^b	1120±1 ^a	1001±2 ^b	1599±1 ^b	200±0 ^c	174±1 ^b	309±0,5 ^b	151±1 ^{ab}	1600±0 ^b	1501±1 ^b	200±2 ^b	49±1 ^a
Sortie palme	1999±1 ^b	1799±1 ^a	1100±1 ^b	1200±2 ^a	1600±0 ^d	1501±2 ^b	70±0,5 ^a	398±1,2 ^b	39±1,2 ^a	450±1 ^b	1800±1 ^b	302±2 ^a	149±1 ^b	301±2 ^b
Sortie témoin	1599±1 ^b	1599±1 ^a	950±1 ^b	999±1 ^a	1298±2 ^c	798±2 ^a	179±1 ^b	159±1,4 ^a	143±2 ^a	2000±0 ^c	2200±2 ^c	299±1 ^a	161±1 ^b	81±1 ^a

a, b, c : Dans chaque colonne, les valeurs identifiées par une même lettre sont statistiquement identiques au seuil de 5%

L'analyse de variance montre que les traitements ont eu un effet hautement significatif ($P < 0,01$) sur la qualité microbiologique de l'eau usée brute, ceci sur l'ensemble de paramètres suivis. A la première série de mesures, les filtres à biochar de rafles de maïs ont présenté des performances plus élevées et statistiquement différentes des autres substrats. Après 60 jours, les performances des filtres à biochar de rafles de maïs ont été statistiquement identiques à celles des filtres à sable dans la réduction des coliformes fécaux, des salmonelles, des shigelles, des streptocoques, des staphylocoques et du vibrion colérique. Les filtres à biochar de noix de coco et de noix de palme ont en revanche été moins performants que les filtres à sable. En outre, le taux de réduction des salmonelles et des shigelles par les filtres à sable a été significativement plus élevé que celui des filtres à biochar de coques de noix de palme et de coco. Seuls les staphylocoques ont été les plus réduits par ces filtres à biochar par rapport aux filtres à sable. De manière générale et pour les deux vagues de mesure, le biochar de rafle de maïs a été plus performant dans la réduction de la contamination microbiologique de l'eau usée initiale. Tresse et *al.* (2006) rapportent que la capacité d'adhésion de certaines bactéries à la surface des grains du massif filtrant décroît en milieu acide. La performance des filtres à biochar de rafles de maïs serait donc liée à son pH initialement plus élevé. De plus, il existerait une certaine compatibilité entre la surface de ce biochar et les différents microorganismes qui aurait permis leur adsorption sur le massif filtrant.

3.3. Effet des biochars sur la croissance végétale

Au cours du traitement, la croissance des végétaux plantés en surface des filtres a été suivie. Les résultats sont donnés à la Figure 4.

Les effets induits par les 3 biochars ont été statistiquement identiques ($P > 0,05$) après 30 et 60 jours de traitement, et identiques à ceux observés

avec le sable témoin. Les paramètres de croissance des plantes ont significativement augmenté entre 30 et 60 jours (Figure 4). Cela peut être lié à l'apport de nutriments minéraux par les biochars qui sont plus riches en minéraux que le sable. La croissance légèrement plus forte des plantes dans les filtres à biochar par rapport aux filtres à sable n'est cependant pas statistiquement significative. On n'observe donc pas d'effet stimulant ni d'effets inhibiteurs majeurs.

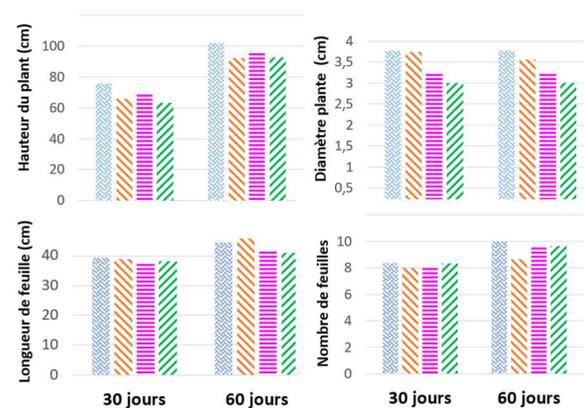


Figure 4 : Suivi de la croissance des végétaux plantés en fonction du type de filtre et de la durée de traitement Charbons de rafles, coco ou palmiste (resp. bleu, jaune, rose), témoin sable (vert)

4. CONCLUSION

Cette étude visait à déterminer l'effet sur le traitement d'eaux usées sur filtres végétalisés de l'ajout de différents biochars produits à partir de rafles de maïs, de coques de noix de coco et de coques de noix de palmiste. Pour cela, des filtres plantés à écoulement vertical expérimentaux ont été mis en place et les paramètres physicochimiques et microbiologiques d'épuration des effluents ont été suivis, ainsi que les paramètres de croissance des plantes épuratrices. Après conduite de l'expérience en condition d'essai pilote, collecte et analyse des données, il en ressort que le biochar de rafles de maïs

a les effets les plus positifs sur le traitement des eaux usées domestiques dans les conditions étudiées. Des essais à plus grande échelle sont nécessaires pour valider ces résultats intermédiaires. Une combinaison avec le biochar de palme ou de coco pourrait potentiellement donner des meilleurs résultats.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leur immense gratitude aux différents laboratoires et unités de recherche de l'Université de Dschang notamment le laboratoire des sols et des eaux, le laboratoire des sciences du sol et l'unité de recherche en botanique appliquée pour avoir fourni un environnement propice à la mise en place de l'expérimentation et pour leur collaboration lors de la réalisation des analyses du sol et de l'eau

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ayesha R., Saman S., Saif-ur-Rehman K., Zeeshan U., Maria K. (2017). To evaluate the efficiency of char and biochar for wastewater treatment. *Journal of waste recycling*, **2**(2), 1-7.
- Dalahmeh, S.S., 2016, Capacity of Biochar Filters for Wastewater Treatment in Onsite Systems—Technical Report; Report 2016-90; Havs och vattenmyndighet: Göteborg, Sweden; Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden, 47 p.; ISBN 978-91-576-9398-3
- Djousse, B. M. K., Allaire, E. S. & Munson, A. D. 2018 Quality of biochars made from eucalyptus tree bark and corn cob using a pilot-scaleretort kiln. *Waste and Biomass Valorization*, **9** (6), 899–909. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9884-2>
- EME C., 2012, Traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés à macrophytes : adaptation de la filière au contexte tropical : état de l'art. Office National de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), France, 76 p.
- Fonkou T., Fonteh M.F., Djousse K.B.M., Amougou A., (2010). Performance des filtres plantés d'Echinocloa pyramidalis dans l'épuration des eaux usées de distillerie en Afrique subsaharienne. *Tropicicultura.*, **28**, 69-76.
- Ghizlane E., Abdelaziz B., Abdelrani Y., Manfred L. (2020). Biochar for wastewater treatment-conversion technologies and applications. *App. Sci.*, **10**, 3390-3492. <https://doi.org/10.3390/app10103492>
- Hach, 2004, Water analysis handbook manual DR/2500 laboratory spectrophotometer. Hach Company World Headquarter, Colorado, U.S.A., p 1309.
- Kaetzl K., Lübken M., Uzuna G., Gehring T., Nettmann E., Stenchly K., Wichern M. (2019). On-farm wastewater treatment using biochar from local agro residues reduces pathogens from irrigation water for safer food production in developing countries. *Sci. Total Environ.*, **682**, 601–610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.142>
- Kaetzl K., Lübken M., Nettmann E., Krimmler S., Wichern M. (2020). Slow sand filtration of raw wastewater using biochar as an alternative filtration media. *Sci. Rep.*, **10**, 1229-1250. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57981-0>
- Kamali M., Appels L., Kwon E. E., Aminabhavi T. M., & Dewil R. (2021). Biochar in water and wastewater treatment - a sustainability assessment. In *Chemical Engineering Journal*, **420**, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129946>.
- Korbinian K., Manfred L., Tito G., Marc W. (2018). Efficient Low-cost anaerobic treatment of wastewater using biochar and woodchip filters, Institute of Urban Water Management and Environmental Engineering: Bochum, Germany, 17 p. <https://doi.org/10.3390/w10070818>
- Shahraki M., Z., & Mao X. (2022). Biochar application in biofiltration systems to remove nutrients, pathogens, and pharmaceutical and personal care products from wastewater. *Journal of Environmental Quality*, **51**(2), 129–151. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20331>
- Molle P., Lienard A., Boutin C., Merlin G., Iwema A. (2005). How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems, *Water Sci. Technol.*, **51**, 11-21. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0277>
- Morand N., 2007, Cahiers des Clauses Techniques Particulières (CCTP), filtres plantés de roseaux. Ministère de l'agriculture et de la pêche, Lyon, France, 76 p.
- Park J.H., Wang J.J., Meng Y., Wei Z., DeLaune R.D., Seo D.C. (2019). Adsorption/desorption behavior of cationic and anionic dyes by biochars prepared at normal and high pyrolysis temperatures. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **572**, 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.04.029>
- Rizwan M., Ali S., Qayyum M.F., Ibrahim M., Ziaurrehman M., Abbas T., Ok Y.S. (2016). Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: A critical review. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **23**, 2230–2248. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5697-7>
- Pignatello J.J., 2011, Interactions of Anthropogenic Organic Chemicals with Natural Organic Matter and Black Carbon in Environmental Particles. Biophysico-Chemical Processes of Anthropogenic Organic Compounds in Environmental Systems, Hoboken, USA, 50 p. <https://doi.org/10.1002/9780470944479.ch1>
- Pauwels J, Van Ranst E, Verloo M, Mvondo Ze A. (1992). Manuel de Laboratoire de Pédologie—méthodes d'analyses de sols et de plantes; équipement et gestion des stocks de verrerie et de produits chimiques. Publications Agricoles nr. 28, A.G.C.D. Bruxelles, Belgique.
- Tresse O., Leuret V., Benezech T., Faille C. (2006). Comparative evaluation of adhesion, surface properties, and surface protein composition of *Listeria monocytogenes* strains after cultivation at constant pH of 5 and 7. *Journal of applied microbiology*, **101**(1), 53- 62. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02968.x>

Visiy E. B., Djousse B. M. K., Lekeufack M., Zangue C. N., Sangodoyin A., Gbadegesin A. S. & Fonkou T. (2022). Effectiveness of biochar filters vegetated with *Echinochloa pyramidalis* in domestic wastewater treatment. *Water Science and Technology*, **85**(9), 2613–2624. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.147>

Xiang W., Zhang X., Chen J., Zou W., He F., Hu X., Tsang D. C. W., Ok Y. S., & Gao B., 2020, Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere*, **252**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126539>

Yang W., Wang Z., Song S., Han J., Chen H., Wang X., Sun R., Cheng J. (2019). Adsorption of copper (II) and lead (II) from seawater using hydrothermal biochar derived from *Enteromorpha*. *Mar. Pollut. Bull.*, **149**, 110-586. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110586>

Zhou X., Wang X., Zhang H., Wu H. (2017). Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using a biochar-amended aerated vertical flow constructed wetland, *Bioresource Technology*., **241**, 269-275. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.072>

Zulfiqar M., Samsudin M.F.R., Sufian S. (2019). Modelling and optimization of photocatalytic degradation of phenol via TiO₂ nanoparticles: An insight into response surface methodology and artificial neural network. *J. Photoch. Photobio.*, **384**, 112-398. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112039>

KOANDA H., 2006. Vers un assainissement urbain durable en Afrique subsaharienne : approche innovante de planification de la gestion des boues de vidange. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. 360 p. <http://dx.doi.org/10.5075/epfl-thesis-3530>

SOH Kengne, E., KENGNE, I.M., NUETSOP, V.F., FOUBI, S.I., AOA, A., STRANDE, L. (2014). Algal diversity and distribution in waste stabilization ponds treating faecal sludge leachate from drying vegetated beds. *International Journal Biological Chemical Sciences*, **8**(3), 946-955, <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i3.11>