



HAL
open science

Potentiel des biochars à base de résidus agricoles pour le traitement des eaux usées domestiques par filtres à flux verticaux plantés d'*Echinochloa pyramidalis*

Boris Merlain KANOOU DJOUSSE, Cybelle Francine Djiokeng Nguiffo, Martin Lekeufack, Edna Buhnyuy Visiy, Sibelle Mouaffo Tsague, Giles Raoul
Meli Lontsi

► To cite this version:

Boris Merlain KANOOU DJOUSSE, Cybelle Francine Djiokeng Nguiffo, Martin Lekeufack, Edna Buhnyuy Visiy, Sibelle Mouaffo Tsague, et al.. Potentiel des biochars à base de résidus agricoles pour le traitement des eaux usées domestiques par filtres à flux verticaux plantés d'*Echinochloa pyramidalis*. 2023. hal-04035400v2

HAL Id: hal-04035400

<https://hal.science/hal-04035400v2>

Preprint submitted on 28 Jul 2023 (v2), last revised 13 Nov 2023 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

1 **POTENTIEL DES BIOCHARS À BASE DE RÉSIDUS AGRICOLES POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES DO-**
2 **MESTIQUES PAR FILTRES À FLUX VERTICAUX PLANTÉS D'*Echinochloa pyramidalis***

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

5 **Boris Merlain KANOOU DJOUSSE^{1*}, Francine Cybelle DJIOKENG NGUIFFO¹, Martin LEKEUFACK², Edna**
6 **Buhnyuy VISIY³, Sibelle MOUAFFO TSAGUE¹, Gilles Raoul MELI LONTSI⁴**

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

9 ²Unité de recherche en botanique appliquée, Département de Biologie végétale, Faculté de Sciences, Univer-
10 sité de Dschang (Uds), B.P. 222 Dschang, Cameroun.

11 ³Pan African University, Life and Earth Sciences Institute (Including Health and Agriculture), P.M.B 20, Ibadan,
12 Nigeria.

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

15 * Auteur Correspondant : djoussemerlain@gmail.com

16 **RESUME**

17 Le traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés est proposé comme une alternative adaptée aux
18 conditions socio-économiques des pays en voie de développement. L'utilisation du biochar dans ces filtres en subs-
19 titution partielle ou totale des massifs filtrants classiques était au centre de la présente étude. L'efficacité épuratoire
20 de trois biochars produits à partir de chacun des trois résidus végétaux (les rafles de maïs, les coques de noix de
21 coco, et les coques de noix de palmiste) pour l'amélioration des performances épuratoires des filtres à flux vertical
22 plantés de roseaux a été étudiée ici. Le dispositif expérimental était constitué de trois filtres à biochars répliqués
23 trois fois et de trois filtres témoins alimentés à 142 l/m²/jr. Les caractéristiques physico-chimiques des eaux ont été
24 mesurées à 30 puis 60 jours depuis le début de l'essai ; les paramètres physiques de croissance des plantes mesu-

25 rées toutes les semaines entre le 30^e et le 60^e jour soit 4 fois. Les résultats révèlent une augmentation du pH, une
26 amélioration de la réduction de la teneur en azote, fer, phosphore et des microbes dans les filtres à biochar compa-
27 ré aux filtres à sable classiques. Globalement, le filtre avec biochar de rafles de maïs a permis d'obtenir de meilleurs
28 résultats au bout de deux mois. Il reste opportun pour les prochaines études de faire le suivi des paramètres sur
29 une plus longue durée et de tester l'effet de la combinaison des trois biochars.

30 **Mots clés** : eaux usées domestiques, biochar, filtres plantés

31 **ABSTRACT**

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

45 **Keywords**: domestic wastewater, biochar, vegetated filters

46 **1. INTRODUCTION**

47 La forte croissance démographique couplée à une urbanisation non contrôlée s'accompagne inévitablement de la
48 production des volumes importants de déchets solides et liquides au rang desquelles les eaux usées domestiques

49 (Zulfiqar et *al.*, 2019). Le rejet non contrôlé de ces déchets dans la nature entraîne inévitablement la dégradation
50 de l'environnement et des ressources de plus en plus limitées. Face à cette situation alarmante, il est important de
51 bien traiter les eaux usées domestiques avant de les rejeter dans l'environnement afin d'éviter la pollution des res-
52 sources en eau de plus en plus limitées et les maladies hydriques. D'après EME (2012), les filtres plantés de macro-
53 phytes sont reconnus aujourd'hui comme des procédés de traitement des eaux usées domestiques adaptés au
54 contexte urbain des pays en développement. Ils peuvent être à écoulement vertical ou horizontal. Le modèle à
55 écoulement vertical, modèle français, a la particularité d'appliquer des eaux brutes sur le filtre, s'affranchissant
56 d'une étape préalable de traitement (EME, 2012). Ce principe de traitement où les processus biologiques sont ma-
57 joritaires est adapté à un type de pollution organique mais présente de faibles capacités à éliminer les polluants
58 chimiques du fait des faibles capacités d'adsorption des matériaux constituant le massif filtrant (Dalameh, 2016).
59 Cela dit, la qualité chimique des effluents issus de ces filtres reste donc inappropriée. Ces résultats mitigés indi-
60 quent la nécessité d'optimiser leur efficacité épuratoire. Le biochar, produit issu de la pyrolyse des résidus agrico-
61 les, forestiers et déchets municipaux attire de plus en plus l'attention des chercheurs ces dernières années en rai-
62 son de sa multifonctionnalité (Ghizlane et *al.*, 2020). Le biochar à travers ses propriétés particulières telles que sa
63 teneur en carbone, sa grande surface spécifique, sa structure hautement poreuse et stable, sa grande capacité
64 d'échange cationique et anionique et ses groupes fonctionnels (Rizwan et *al.*, 2016), a la capacité d'adsorber diffé-
65 rents polluants de l'eau tels que les agents pathogènes (Kaetz et *al.*, 2020) ; les polluants inorganiques comme les
66 métaux lourds (Yang et *al.*, 2019) et les polluants organiques (Park et *al.*, 2019). Au regard de ces effets bénéfiques
67 rapportés, il serait intéressant d'évaluer l'aptitude des biochars produits à partir des résidus végétaux disponibles
68 localement, à améliorer l'efficacité des filtres plantés à écoulement vertical. La présente étude visait donc principa-
69 lement à améliorer l'efficacité de ces filtres lorsqu'utilisés pour le traitement des eaux usées domestiques. Il
70 s'agissait plus spécifiquement de concevoir et mettre en place des filtres à biochar plantés de roseaux, de détermi-
71 ner l'effet de 03 biochars produits à partir de chacun des trois résidus végétaux (rafles de maïs, coques de noix de
72 coco, coques de noix de palmiste), sur les performances épuratoires des filtres et enfin, de déterminer l'effet du
73 biochar sur les paramètres de croissance des macrophytes dans les filtres.

74 2. MATERIEL ET METHODES

75 2.1. Présentation de la zone d'étude

76 Cette étude a été menée à la station expérimentale d'épuration des eaux usées de l'Université de Dschang,
77 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
78 prétraitée qui provient de la cité universitaire à un débit de $3 \text{ m}^3/\text{jour}$. L'eau usée utilisée pour l'étude a été collec-
79 tée dans le bassin d'égalisation de la station de traitement existante, après avoir subi un traitement primaire. La
80 station d'épuration est ouverte à la nature et reçoit donc l'eau de pluie pendant la saison des pluies.

81 2.2. Dispositif expérimental

82 Le dispositif expérimental était constitué de trois traitements (03 filtres avec 03 biochars différents) répété
83 chacun 3 fois. Et de trois témoins (filtres classiques sans biochar) soit 12 filtres au total alimentés par trois grandes
84 bassines de 50 litres chacune disposées sur une table afin de faciliter l'alimentation par gravité des filtres (figure 3).
85 Le massif filtrant était fait à l'image de celui des filtres à sable lent (les trois filtres témoin). Dans chacun des neuf
86 autres filtres, une partie du sable fin a été substituée par le biochar (Figure 2). Les biochars utilisés étaient obtenus
87 par pyrolyse lente de trois résidus végétaux à savoir : les rafles de maïs, les coques de noix de coco, et les coques de
88 noix de palmiste. Ces résidus agricoles ont été choisis en raison de leur disponibilité locale en grande quantité. Il est
89 à noter que les coques de noix de palmiste posent un problème sanitaire dans les zones de grande production et
90 une valorisation permettra de résoudre ce problème. Après production du biochar, il a été écrasé et tamisé pour
91 obtenir les granulométries comprises entre 0,25 - 2 mm. Cette granulométrie a été choisie suivant les granulomé-
92 tries de la couche filtrante du second étage des filtres plantés à écoulement vertical (Molle et al., 2005). La granu-
93 lométrie comprise entre 0,25 mm et 1 mm a été utilisée pour le sable. Pour ce qui est du gravier, deux granulomé-
94 tries ont été utilisées à savoir : celle comprise entre 2 mm et 12 mm et celle comprise entre 10 et 20 mm (Morand,
95 2007). La figure 1 présente ces substrats, leur caractérisation a été faite suivant les méthodes proposées par Pau-
96 wels et collaborateurs (Pauwels et al., 1992). *Echinochloa pyramidalis* (communément appelé Roseau) a été choisie
97 pour les essais d'épuration compte tenu de son efficacité épuratoire reportée dans les travaux précédents (Fonkou
98 et al., 2010) ; et de sa disponibilité dans la zone d'étude. Des jeunes pousses d'une hauteur moyenne de $21 \pm 5 \text{ cm}$

99 et possédant entre 2 et 5 feuilles avec un système racinaire long de 5 ± 3 cm, ont été prélevés à l'aide d'une machet-
100 te, caractérisés et repiqués dans les filtres le même jour à raison de six plants par filtre soit une densité de 85 plants
101 au m^2 .



102
103

104
105
106

Figure 1 : Substrats calibrés (Biochars, sable et gravier)

107 **2.3. Mise en place du dispositif**

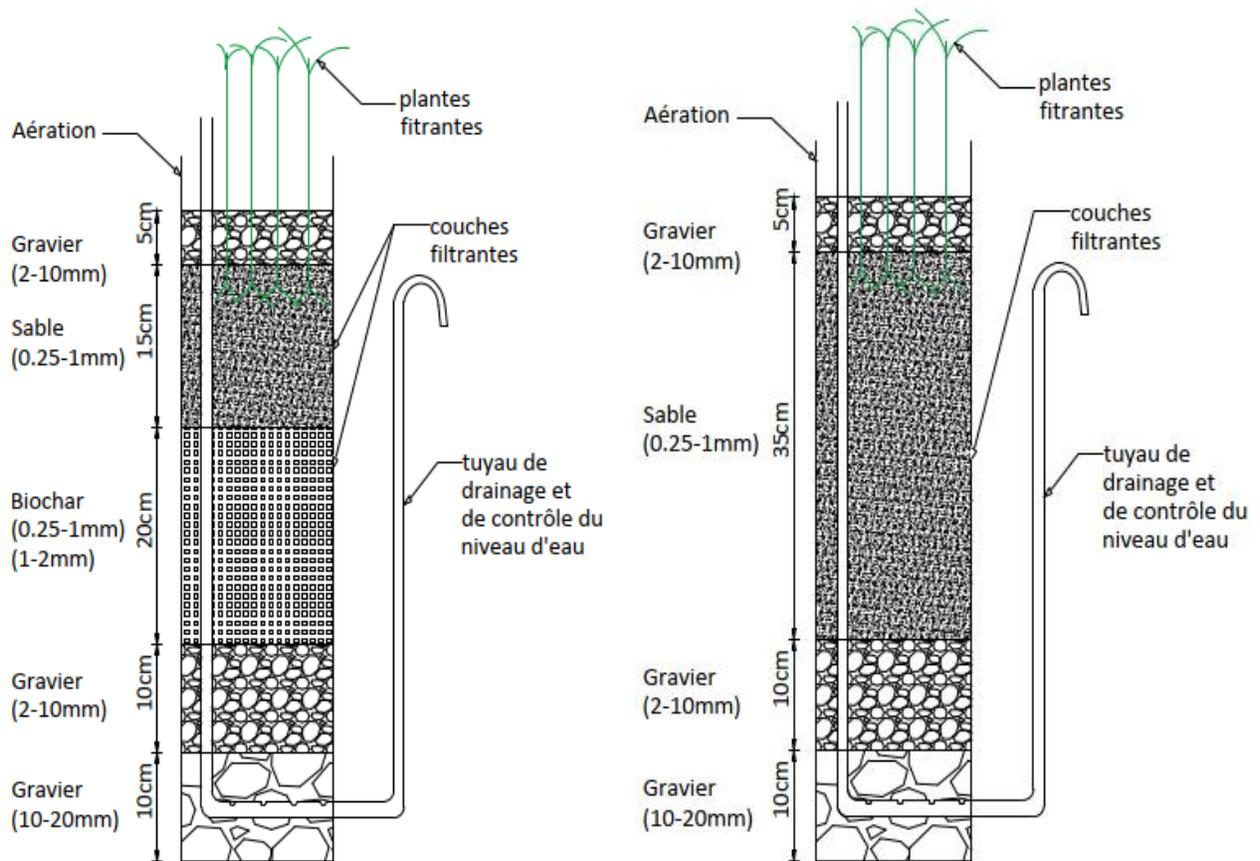
108 Un substrat de 60 cm d'épaisseur a été introduit dans chacun des filtres. Ce substrat est constitué de la base
109 du filtre au sommet successivement des couches suivantes (Figure 2) :

- 110 i) 10 cm de gravier de granulométrie comprise entre 10 et 20 mm (couche drainante) ;
- 111 ii) 10 cm de gravillon de granulométrie 2 à 10 mm servant de couche de transition ;
- 112 iii) Grille de séparation de maille 1 mm pour éviter la migration du biochar dans du gravier ;
- 113 iv) Biochar de granulométrie 1 mm à 2 mm et 0,25 mm à 1 mm successivement dans les filtres devant rece-
114 voir du biochar, sur une épaisseur de 20 cm ;
- 115 v) Grille de séparation des couches de biochar et de sable ;

116 vi) Sable fin (de granulométrie 0,25 à 1 mm) sur 15 cm d'épaisseur. Notons que les couches de biochar et de
117 sable constituent la couche de filtration. Dans les filtres témoins, la couche de filtration est uniquement
118 constituée de sable fin (sur une épaisseur de 35 cm) ;

119 vii) Au-dessus de la couche filtrante, une couche de gravier de granulométrie 2 à 10 mm et d'épaisseur 2 cm a
120 été introduite pour recevoir de l'eau brute et assurer une répartition uniforme sur la surface du filtre.

121 Une fois les différentes couches constituant le massif filtrant disposées, les filtres ont été saturés en eau et six
122 jeunes pousses d'*Echinochloa pyramidalis* plantées par filtre. La saturation a été maintenue pendant l'acclimatation
123 des jeunes plants en maintenant en position verticale les tuyaux de sortie d'eau du filtre à la hauteur du substrat
124 dans le filtre. Une fois les plantes acclimatées, ces tuyaux ont été abaissés et maintenus à une hauteur de 40 cm
125 (limite supérieure de la couche de biochar). Ceci permettait d'avoir à la fois des conditions aérobies et anaéro-
126 biques, nécessaires à l'épuration des eaux. Les différents filtres étaient alimentés en continue par les eaux usées
127 domestiques prétraitées, à une charge hydraulique de 142 l/m² / jr. La figure 2 présente la Coupe longitudinale des



128 filtres utilisés.

129

Filtre à biochar (a)

Filtre à sable (b)

130

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

131

La différence entre ces deux filtres se situe au niveau de la couche de filtration. Elle est constituée de 58 %

132

de biochar et 42 % de sable dans les filtres à biochar et de 100% de sable dans les filtres à sable. La figure 3 pré-

133

sente le dispositif après 30 jours et 60 jours de fonctionnement.

134



(a)



(b)

135

Figure 3. Dispositif en fonctionnement après 30 (a) et 60 (b) jours

136

137

2.4. Mesure des paramètres physicochimiques et microbiologiques des effluents

138

Deux échantillonnages ont été analysés : le premier après 30 jours de fonctionnement et le second après que la

139

végétation se soit bien développée (60 jours), Notons que les paramètres physicochimiques et microbiologiques de

140

l'eau ont été déterminés avant et après traitement en analysant des échantillons obtenus à l'entrée et à la sortie de

141

chacun des douze filtres. Les échantillons ont été prélevés dans la matinée à la sortie de chaque filtre dans des

142

bouteilles en verre borosilicaté de 0,4 L préalablement stérilisées à l'autoclave à 115° C pendant 15 minutes et

143

transportés dans une glacière à 4°C au laboratoire pour analyse. En laboratoire, les paramètres physicochimiques

144

ont été mesurés suivant les méthodes décrites par Hach (Hach, 2004) pour l'analyse des eaux et eaux usées. Les

145

paramètres mesurés comprenaient : le pH, la turbidité, la conductivité électrique (CE), la demande biochimique en

146

oxygène (DBO5), la demande chimique en oxygène (COD), l'azote total, les nitrates, les nitrites, base échangeables

147

(Fe²⁺, Ca²⁺), les phosphates (PO₄³⁻), les coliformes totaux (CT) les coliformes fécaux (FC), les salmonelles, les shi-

148 gelles, les staphylocoques, les streptocoques et les vibrions. Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre Eutech Ins-
149 truments CyberScan 1500. La turbidité a été mesurée à partir d'un turbidimètre DRT 100B ; La conductivité élec-
150 trique (EC) a été mesurés à l'aide du compteur de conductivité/TDS Hach 44600 vintage. L'azote total, les nitrites,
151 les nitrates, les phosphates et la DCO ont été mesurés avec un spectrophotomètre Hach DR/2500. La valeur de
152 DBO₅ a été mesurée à l'aide d'un DBOmètre numérique de marque VELP SCIENTIFICA dans un incubateur à 20°C
153 pendant 5 jours. L'azote a été déterminée par la méthode Kjeldahl. Les méthodes suivantes ont été utilisées pour la
154 détermination des paramètres microbiologiques : la méthode de filtration sur membrane pour les coliformes to-
155 taux, coliformes fécaux ; la méthode de CHAPMAN pour les staphylocoques ; la méthode par tubes multiples pour
156 les salmonelles ; La méthode du NPP (nombre le plus probable) pour les vibrions (APHA,1998). Ces paramètres ont
157 été choisis sur la base des données de la littérature.

158 **2.5. Evaluation du comportement des plantes épuratrices**

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

164 **2.6. Analyses statistiques**

165 Les données collectées ont été analysées avec le logiciel Genstat version 9.0. L'ANOVA unidirectionnelle a été
166 utilisée pour comparer les valeurs moyennes de différentes unités expérimentales et le test de Tukey a été utilisé
167 pour la comparaison post hoc. Les tests de Kolmogorov-Smirnov et le test de Shapiro-Wilk ont permis de vérifier la
168 normalité des données avant la réalisation de l'ANOVA.

169 **2.7. RESULTATS ET DISCUSSION**

170 **2.7.1. Caractéristiques des substrats**

171 Les trois types de biochar et le sable ont été analysés avant l'expérience pour avoir une idée de leurs caracté-
172 ristiques physicochimiques. Le tableau 1 présente les résultats obtenus. Il en ressort que le biochar de rafles de

173 maïs est plus riche en éléments chimiques que les autres substrats. Ceci est probablement due à la composition
 174 initiale du résidu (Djousse et al. 2019).

175

176 **Tableau 1. Caractéristiques physicochimiques des substrats utilisés**

Paramètres	Biochar			Sable
	Rafles de maïs	Coques de noix de coco	Coques de noix de palmiste	
pH	9,6	9,3	7,2	7,1
Conductivité (µS/cm)	4,0	1,4	0,2	0,0
Azote total (mg/kg)	0,6	0,5	0,2	0,1
N-nitrates (mg/kg)	0,1	0,8	0,1	0,1
N- nitrite (mg/kg)	0,1	0,1	0,0	0,1
Phosphore total (mg/kg)	24,0	24,0	12,0	18,0
Fer (mg/kg)	7,1	6,6	5,8	4,5
Potassium (mg/kg)	2044,5	5427,6	1530,6	329,7
Calcium (mg/kg)	368,0	256,0	224,0	32,0
Sodium (mg/kg)	1308,9	620,0	177,3	69,1
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

177

178 **2.7.2. Effets des traitements sur les paramètres des effluents**

179 **2.7.2.1. Paramètres physiques**

180 A l'observation, les effluents des filtres étaient plus clairs par rapport à l'eau usée brute. Le tableau 2 pré-
 181 sente la séparation des moyennes des paramètres physiques par type de traitement.

182 **Tableau 2. Séparation des moyennes des paramètres physiques par type de traitement**

Traitements	pH		Turbidité (NTU)		Conductivité (mS/cm)	
	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs
Eau brute	8,0±0,1 ^a	7,5±0 ^a	67,1±0 ^a	179,8±0 ^c	2,8±0 ^a	1,8±0 ^b
B maïs	8±0,1 ^a	8,3±0,3 ^a	46,3±0,4 ^a	10,2±0,2 ^a	2,7±0,1 ^a	0,8±0,1 ^a

B coco	8±0,2 ^a	8,0±0,1 ^a	43,4±0,4 ^a	21,7±0,1 ^a	2,8±0,1 ^a	0,9±0,1 ^a
B palme	8±0,1 ^a	7,7±0,4 ^a	42,9±0,4 ^a	14,8±0,4 ^a	2,6±0,2 ^a	0,9±0,2 ^a
Témoin	8±0,1 ^a	7,5±0,2 ^a	53,6±0,3 ^a	51,4±0,2 ^b	2,7±0,1 ^a	0,9±0,1 ^a

183 NB : les moyennes ayant les lettres identiques (sur la même colonne) sont statistiquement identiques au
184 seuil signification de 5%

185 Les résultats de l'ANOVA sur les paramètres physiques des effluents montrent que les traitements n'ont pas eu
186 d'effet significatif sur le pH de l'eau brute après 30 et 60 jours de traitement. Toutefois, une augmentation générale
187 est observée dans les filtres avec biochar avec le temps, par rapport aux filtres à sable qui n'ont entraîné aucune
188 variation. Le biochar de rafles de maïs étant celui dont le degré d'augmentation a été le plus important (de 0,77
189 unités à 60 jours). Ceci peut s'expliquer par la libération des bases fortement contenues dans ce biochar étant don-
190 né son pH initialement élevé. Ces résultats corroborent ceux de Visiy et al. (2022) qui ont aussi observé une aug-
191 mentation du pH dans les filtres à biochar par rapport aux filtres à sables mais pas une différence significative au
192 seuil signification de 5%.

193 La turbidité a été significativement réduite ($P < 0,001$) pour tous les filtres après 60 jours, les filtres à biochar
194 étant plus performants (avec des rendements de 94,4 %, 91,8 % et 87,9 % respectivement du biochar de rafles de
195 maïs, de coques de palme et de coque de coco contre 71,4% au niveau du sable). Ce résultat se rapproche de celui
196 obtenu par Korbinian et al. (2018) qui rapporte une réduction plus importante de la turbidité de l'eau usée dans les
197 filtres à biochar (93 %) par rapport aux filtres à sable (87 %).

198 La conductivité de l'eau initiale a été significativement réduite par tous les filtres à 60 jours de traitement
199 ($p < 0,005$) avec des effets statistiquement identiques. Les ions solubles responsables de la conductivité de l'eau sont
200 progressivement retenus à la surface des substrats et consommés par les microorganismes présents pour leurs
201 activités biologiques. La réduction de la conductivité à 60 jours pourrait également être attribuée à la forte crois-
202 sance des plantes. La croissance des plantes dans les filtres plantés est connue pour diminuer la concentration de
203 solides dissous et par conséquent la conductivité électrique.

204 **2.7.3. Paramètres chimiques**

205 **1) Pollution organique (DBO₅ et DCO)**

206 Généralement, le type de traitement a eu un effet hautement significatif ($p < 0,01$) sur la DCO et la DBO₅ de
 207 l'eau usée après 30 et 60 jours de traitement. La séparation des moyennes est présentée dans le tableau 3.

208 **Tableau 3. Séparation des moyennes des DCO et DBO₅ par type de traitement**

Traitements	DCO (mg/l)		DBO ₅ (mg/l)	
	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs
Eau brute (entrée)	9830±0 ^c	16000±0 ^b	377,0±0 ^b	319,0±0 ^b
B maïs	9670±0,8 ^c	3439±0,9 ^a	124,7±1,2 ^a	92,8±0,6 ^a
B coco	1911±0,8 ^a	1905±1,2 ^a	154±0,8 ^a	107±0,8 ^a
B palme	6109±0,8 ^b	2564±0,9 ^a	115,7±0,5 ^a	88±0,8 ^a
Témoin	8102±0,9 ^c	4818±1,2 ^a	131,3±1,2 ^a	127,7±1,2 ^a

209 NB : les moyennes ayant les lettres identiques (sur la même colonne) sont statistiquement identiques au
 210 seuil signification de 5%.

211
 212 La DCO a été significativement réduite ($P < 0,01$) par tous les substrats après 60 jours de traitement avec des
 213 effets statistiquement identiques. Globalement, Les filtres à biochar de noix de coco étaient les plus performants
 214 durant toute la période de traitement avec des rendements de 65,3 % et 91,6 % de réduction respectivement après
 215 30 et 60 jours de traitement contre 11,6 % et 62,7 % dans les filtres à sable. Ce résultat corrobore ceux de Zhou et
 216 *al.* (2017) ont obtenu des rendements de 94,4 % et 80,0 % respectivement pour les filtres à biochar et sable après
 217 90 jours. Kaetzi et *al.* (2020) ont eu des rendements de 74 % et 61 % et de Korbinian et *al.* (2018) ont obtenus des
 218 rendements de 87 % et 74% respectivement des filtres à biochar et à sable à l'issu du traitement des eaux usées
 219 domestiques.

220 Pour ce qui est de la DBO₅, les performances des filtres à biochar ont été statistiquement identiques à celles
 221 des filtres à sable pour les deux vagues de mesure. Toutefois, les filtres à biochar ont présenté des rendements plus
 222 importants. Le biochar de noix de palme a été le plus performant avec des rendements de 69,0 % et 76,5 % contre
 223 63,3 % et 62,4 % des filtres à sable après 30 et 60 jours. Comme dans cette étude, Dalahmeh (2016) a débouché sur
 224 une performance meilleure des filtres à biochar de bois (98 % de réduction) par rapport aux filtres à sable (70 % de

225 réduction) dans la réduction de la DBO₅ des eaux usées, avec une charge hydraulique de 37 litres/m²/jr sur une
 226 période de 120 jours.

227 La matière organique particulaire et dissoute de l'eau usée peut être réduite par plusieurs mécanismes no-
 228 tamment, l'adsorption le filtration, l'oxydation chimique, l'hydrolyse et l'assimilation biologique par les microorga-
 229 nismes (biofilm). L'efficacité des filtres dans la réduction de la charge polluante organique varie en fonction des
 230 caractéristiques du substrat qui y est contenu à l'instar de la surface spécifique et de l'habilité à promouvoir le déve-
 231 loppement du biofilm (Kaetzel et al., 2019). Les biochars utilisés dans cette étude étaient plus riches en cendres et en
 232 minéraux que le sable (Tableau 1). Ainsi, le biofilm responsable de la réduction de la pollution organique se serait
 233 rapidement développé dans les filtres à biochar en se nourrissant des éléments nutritifs présents, d'où les meilleu-
 234 res performances. En outre, la structure poreuse du biochar et sa grande surface spécifique rapportées par de
 235 nombreux auteurs favoriseraient l'adsorption de certains composés organiques et la colonisation rapide du substrat
 236 par le biofilm (Kadlec et Wallace, 2008) plus importante comparée aux filtres à sable.

237 2) Azote total, Nitrates et nitrites

238 Les différents filtres ont eu un effet hautement significatif ($p < 0,01$) sur la concentration en azote total, nitrates
 239 et nitrites pour les deux vagues de traitement. Le tableau 4 montre la séparation des moyennes de l'azote total, des
 240 nitrates et nitrites par type de traitement.

241 **Tableau 4. Séparation des moyennes de l'azote total, des nitrates et nitrites par type de traitement**

Traitements	N total (mg/l)		N – NO ₃ ⁻ (mg/l)		NO ₂ ⁻ mg/l)	
	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs	30 jours	60 jours
Eau brute (entrée)	37,7±0 ^d	12,0±0 ^b	0,26±0 ^a	0,10±0 ^d	0,19±0 ^a	0,07±0 ^d
B maïs	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
B 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
B 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
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

242 NB : les moyennes ayant les lettres identiques (sur la même colonne) sont statistiquement identiques au
 243 seuil signification de 5%.

244 Une réduction générale de la concentration en azote totale par tous les filtres après 60 jours de fonctionne-
 245 ment a été obtenue. Les performances des filtres à biochar de noix de palme et de rafles de maïs avec des rende-
 246 ments de 52,7 % et 29,7 % respectivement étaient plus élevées et statistiquement différents de celles des filtres à
 247 sable (13,6 %). Plusieurs travaux de recherche ont abouti à un résultat similaire dans la réduction de l'azote total.
 248 Zhou *et al.* (2017) ont obtenu des rendements de 52,7 % dans des expériences réalisées avec des filtres plantés à
 249 biochar de bambous contre 29,9 % pour les filtres à sables après 90 jours. Dalahmeh (2016) a obtenu des rende-
 250 ments de 50 % et 5 % respectivement des filtres à biochar et à sable après 150 jours. Par rapport aux résultats ob-
 251 tenus dans cette étude, ces rendements sont plus faibles. Ceci serait certainement due à la composition des résidus
 252 initiaux et aux conditions de production des biochars qui étaient différentes mais aussi à notre durée d'essai plus
 253 courte. La réduction de l'azote total peut se faire par adsorption, assimilation biologique par le biofilm, nitrification
 254 et dénitrification. Ces processus seraient plus importants dans les filtres à biochar à raison des conditions qui y sont
 255 plus favorables (Xiang *et al.*, 2020 ; Kamali *et al.*, 2021 ; Shahraki *et al.*, 2022).

256 3) Calcium et Magnésium (Ca²⁺ et Mg²⁺)

257 Les différents filtres ont eu un effet significatif ($p < 0,05$) sur la concentration en calcium de l'eau brute après
 258 30 et 60 jours avec des effets statistiquement identiques dans les deux vagues (Tableau 5). Cependant, une perfor-
 259 mance plus élevée a été observée dans les filtres au biochar après 60 jours avec de rendements de 59,0 %, 58,0 %, 47,6 %
 260 et 43,9 % respectivement pour le biochar palme, biochar maïs, biochar coco et sable. Pour le magnésium,
 261 une différence significative entre les traitements n'a été observée qu'en première analyse (30 jours) avec des filtres
 262 à sable enregistrant un taux de réduction négatif. Il n'y avait pas de différence significative entre les filtres à biochar
 263 après 30 et 60 jours pour la réduction des bases échangeables.

264 **Tableau 5. Séparation des moyennes pour le Calcium et le Magnésium par type de traitement**

Traitements	Ca ²⁺ (mg/l)		Mg ²⁺ (mg/l)	
	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs
Eau brute (entrée)	7,2±0 ^b	21,2±0 ^b	2,4±0 ^b	5,8±0 ^a
B maïs	10,7±0,4 ^a	9,8±0,3 ^a	2,9±0,04 ^a	1,3±0,8 ^a

B coco	10,7±0,4 ^a	10,3±0,5 ^a	2,4±0,01 ^a	3,2±1,6 ^a
B palme	10,8±0,3 ^a	9,93±0,3 ^a	2,4±0,02 ^a	2,1±0,6 ^a
Témoin	0,4±0,7 ^a	12,7±0,4 ^a	4,1±0,6 ^b	3,1±1,5 ^a

265 NB : les moyennes ayant les lettres identiques (sur la même colonne) sont statistiquement identiques au seuil signi-
 266 fication de 5%.

267
 268 La réduction de la concentration en minéraux est liée au fait que les minéraux positivement chargés se fixent
 269 à la surface du massif filtrant faisant suite à une attraction électrostatique. Cette attraction est plus importante dans
 270 des filtres à biochar étant donné que le biochar comporte des groupes fonctionnels contenant de l'oxygène tels que
 271 les carboxylates, les groupes COOH et hydroxyles (OH) qui sont négativement chargés et ont par conséquent une
 272 forte interaction avec les minéraux (Ayesha et al., 2017).

273 4) Le Fer (Fe²⁺) et les phosphates

274 Le tableau 6 présente les valeurs moyennes des teneurs en Fer et phosphate avant et après traitement pour
 275 chaque type de filtre.

276 **Tableau 6 : Séparation des valeurs moyennes des minéraux par type de traitement**

Traitements	Fe ²⁺ (mg/l)		Phosphate (mg/l)	
	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs
Eau brute (entrée)	14,31±0 ^c	14,31±0 ^c	52,7±0 ^d	52,7±0 ^d
B maïs	11,51±0,1 ^{bc}	0,002±0,001 ^a	15,5±0,1 ^c	15,8±0,1 ^a
B coco	11±0,1 ^{bc}	0,003±0,001 ^a	23,6±0,1 ^a	17,4±0,1 ^b
B palme	6,61±0,1 ^a	0,002±0,001 ^a	36,6±0,2 ^b	22,6±0,1 ^b
Témoin	10,36±0,1 ^{bc}	0,200±0,01 ^b	12,7±0,1 ^c	23,1±0,1 ^c

277 NB : les moyennes ayant les lettres identiques sur la même colonne sont statistiquement identiques à 5%.

278
 279 Les différents filtres ont eu un effet significatif ($p < 0,05$) sur la concentration en fer de l'eau brute après 30 et
 280 60 jours. Il ressort de la séparation des moyennes (tableau 6) qu'après 30 jours de traitement, les filtres à biochar
 281 de coque de palme ont été plus performants dans la réduction de la concentration en fer (39,6 %) contre 17,5 %,
 282 15,7 % et 27,6 % respectivement dans les filtres de biochar à maïs, biochar à noix de coco et du sable. Après 60
 283 jours, la concentration en fer de l'eau brute a été significativement réduite par tous les filtres ; les filtres au biochar

284 étant plus performants que les filtres à sable ($p < 0,05$). Les filtres à biochar ont été plus performants et statisti-
285 quement différents des filtres à sable. On note des rendements de 99,9 % ; 99,9 % ; 99,0% et 84,7 % respectivement
286 des biochars de rafles de maïs, de coques de coco, de coques de palme et des filtres à sable pour le Fer. Ayesha et
287 *al.* (2017) rapportent un résultat similaire sur l'efficacité des filtres plantés à biochar (avec un rendement de 90 %)
288 dans la réduction de la concentration en métaux lourds (Fe, Zn, Cu, Ni) des eaux usées.

289 Pour ce qui est des phosphates, les différents filtres ont eu un effet hautement significatif ($p < 0,01$) sur la
290 concentration en phosphate initiale. La séparation des moyennes (tableau 6) montre qu'à 60 jours d'épuration, les
291 filtres à biochar ont été plus performants que les filtres à sable avec des rendements de 75,3 % ; 68,7% et 61,9%
292 respectivement du biochar rafles de maïs, coque de coco et coque de palmiste contre un rendement de 41,2% des
293 filtres à sable uniquement. L'adsorption est le principal mécanisme par lequel les phosphates sont réduits dans les
294 filtres et la capacité d'un substrat à retenir le phosphore dépend de son pH et de sa concentration en minéraux
295 (Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+}) (Pignatello, 2011) d'où la meilleure performance des filtres à biochar.

296 **2.7.4. Paramètres microbiologiques**

297 L'analyse de variance montre que les traitements ont eu un effet hautement significatif ($P < 0,01$) sur la quali-
298 té microbiologique de l'eau usée brute ; ceci sur toutes les bactéries étudiées. La séparation des moyennes est pré-
299 sentée dans le tableau 8.

300 A la première vague de mesure, les filtres à biochar de rafles de maïs ont présenté des performances plus
301 élevées et statistiquement différentes des autres substrats. Après 60 jours, les performances des filtres à biochar de
302 rafles de maïs ont été statistiquement identiques à celles des filtres à sable dans la réduction des coliformes fécaux,
303 des salmonelles, des shigelles, des streptocoques, des staphylocoques et du vibron colérique.

304 Les filtres à biochar de noix de coco et de noix de palme ont en revanche été moins performants que les fil-
305 tres à sable. En outre, le taux de réduction des salmonelles et des shigelles par les filtres à sable a été significative-
306 ment plus élevé que celui des filtres à biochar de coques de noix de palme et de coco. Seuls les staphylocoques ont
307 été les plus réduits par ces filtres à biochar par rapport aux filtres à sable.

308 De manière générale et pour les deux vagues de mesure, le biochar de rafle de maïs a été plus performant
309 dans la réduction de la contamination microbiologique de l'eau usée initiale. Tresse et *al.* (2006) rapportent que la
310 capacité d'adhésion de certaines bactéries à la surface du massif filtrant décroît en milieu acide. La performance des
311 filtres à biochar de rafles de maïs serait donc liée à son pH initialement plus élevé. De plus, il existerait une certaine
312 compatibilité entre la surface de ce biochar et les différents microorganismes qui aurait permis leur adsorption sur
313 le massif filtrant.

314 **Tableau 8. Séparation des moyennes des paramètres microbiologiques (CFU/ml) par type de traitement**

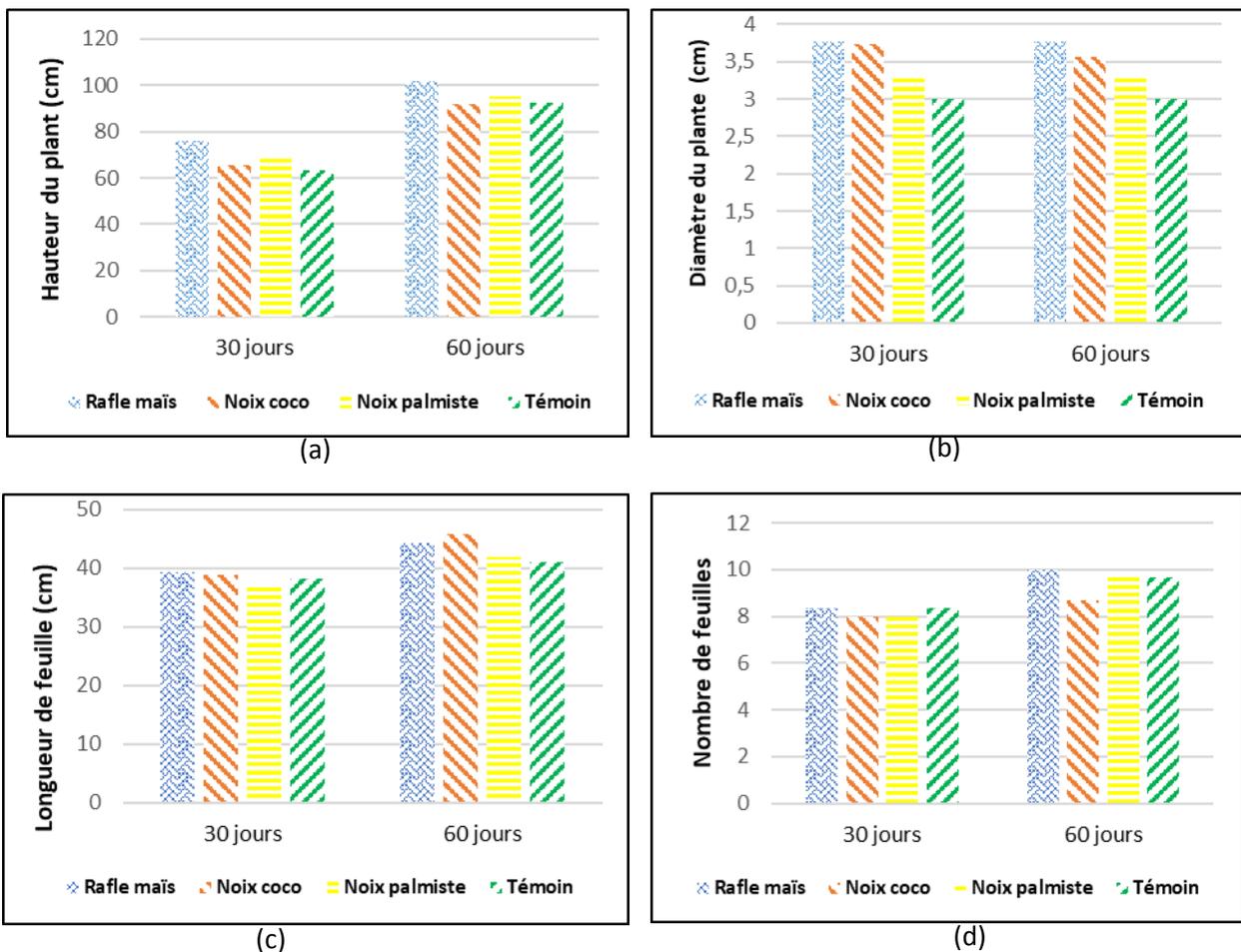
Traitements	Coliformes totaux		Coliformes fécaux		Salmonelles		Shigelles		Staphylocoques		Streptocoques		Vibrien	
	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs	30jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs	30 jrs	60 jrs	30jrs	60 jrs
Eau brute	3000±0 ^c	7000±0 ^b	1800±0 ^b	5500±0 ^b	1800±0 ^d	4500±0 ^c	500±0 ^d	1000±0 ^c	600±0 ^c	4000±0 ^d	2800±0 ^d	1500±0 ^b	480±0 ^c	1000±0 ^c
B maïs	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
B 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
B palme	1999±1 ^b	1799±1 ^a	1100±0, ^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
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

315 NB : les moyennes ayant les lettres identiques (sur la même colonne) sont statistiquement identiques à 5%.

316

317 **2.8. Effets des biochars sur les paramètres de croissance des plantes**

318 Les effets des différents filtres sur les paramètres de croissance des plantes ont été statistiquement identi-
319 qués ($P>0,05$) à 30 et 60 jours de traitement. Cependant les paramètres de croissance des plantes ont significati-
320 vement augmenté entre 30 et 60 jours (Figure 4). Bien que non statistiquement significative, il a été observé une
321 croissance plus importante des plantes dans les filtres à biochar par rapport aux filtres à sable uniquement. Le bio-
322 char de rafles de maïs étant le substrat dans lequel la croissance est plus rapide. En effet, les plantes consomment
323 les éléments nutritifs dans l'eau et ceux retenus par le massif filtrant pour se développer. Ces minéraux sont plus
324 importants dans des substrats à biochar étant donné leur richesse en ces minéraux comparé au sable. La Figure
325 4 présente le dispositif en fonctionnement après 30 et 60 jours.



326
327 **Figure 4 : Paramètres de croissance des plantes par traitement : Hauteur du plant (a), diamètre (b), longueur de**
328 **feuille (c), et nombre de feuille**

329 **3. CONCLUSION**

330 Cette étude visait à déterminer l'effet de l'ajout de différents biochars produits à partir des rafles de maïs,
331 des coques de noix de coco et des coques de noix de palmiste, sur les paramètres physicochimiques et microbiolo-
332 giques des effluents ; et sur les paramètres de croissance des plantes épuratrices. Après conduite de l'expérience en
333 condition d'essai pilote, collecte et analyse des données, il en ressort au vue des performances épuratoires du bio-
334 char de rafles de maïs, que ce dernier peut être fortement suggéré comme substitut de sable pour le traitement des
335 eaux usées domestiques dans les filtres plantés à écoulement vertical. Ceci sous réserve des essais à grande échelle.
336 Une combinaison avec le biochar de palme ou de coco pourrait potentiellement donner des meilleurs résultats.

337 **4. REMERCIEMENTS**

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

342 **5. RÉFÉRENCES**

- 343 1. American Public Health Association (APHA), Water Environment Federation, 1998, Standard Methods for the
344 Examination of Water and Wastewater: 20th edition. Washington, DC, USA. 1220 p
- 345 2. Ayesha R., Saman S., Saif-ur-Rehman K., Zeeshan U., Maria K., 2017, To evaluate the efficiency of char and
346 biochar for wastewater treatment. Journal of waste recycling, **2**(2), 1-7.
- 347 3. Dalahmeh, S.S., 2016, Capacity of Biochar Filters for Wastewater Treatment in Onsite Systems—Technical Re-
348 port; Report 2016-90; Havs och vattenmyndighet: Göteborg, Sweden; Swedish University of Agricultural Sci-
349 ences: Uppsala, Sweden, 47 p.; ISBN 978-91-576-9398-3.

- 350 4. Djousse, B. M. K., Allaire, E. S. & Munson, A. D. 2018 Quality of biochars made from eucalyptus tree bark and
351 corncob using a pilot-scaleretort kiln. *Waste and Biomass Valorization* 9 (6), 899–909.
352 <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9884-2>
- 353 5. EME C., 2012, Traitement des eaux usées domestiques par filtres plantés à macrophytes : adaptation de la
354 filière au contexte tropical : état de l'art. Office National de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), France,
355 76 p.
- 356 6. Fonkou T., Fonteh M.F., Djousse K.B.M., Amougou A., 2010. Performance des filtres plantés d'Echinochloa
357 pyramidalis dans l'épuration des eaux usées de distillerie en Afrique subsaharienne. *Tropicultura.*, **28**, 69-76.
- 358 7. Ghizlane E., Abdelaziz B., Abdelrani Y., Manfred L., 2020, Biochar for wastewater treatment-conversion tech-
359 nologies and applications. *App. Sci.*, **10**, 3390-3492.
- 360 8. Hach, 2004, Water analysis handbook manual DR/2500 laboratory spectrophotometer. Hach Company World
361 Headquarter, Colorado, U.S.A., p 1309.
- 362 9. Kaetzl K., Lübken M., Uzuna G., Gehring T., Nettmann E., Stenchly K., Wichern M., 2019, On-farm wastewater
363 treatment using biochar from local agro residues reduces pathogens from irrigation water for safer food pro-
364 duction in developing countries. *Sci. Total Environ.*, **682**, 601–610.
- 365 10. Kaetzl K., Lübken M., Nettmann E., Krimmler S., Wichern M., 2020, Slow sand filtration of raw wastewater
366 using biochar as an alternative filtration media. *Sci. Rep.*, **10**, 1229-1250.
- 367 11. Kamali M., Appels L., Kwon E. E., Aminabhavi T. M., & Dewil R., 2021, Biochar in water and waste-
368 water treatment - a sustainability assessment. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 420) 1-21. El-
369 sevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129946>.
- 370 12. Korbinian K., Manfred L., Tito G., Marc W., 2018, Efficient Low-cost anaerobic treatment of wastewater using
371 biochar and woodchip filters, Institute of Urban Water Management and Environmental Engineering: Bo-
372 chum, Germany, 17 p.

- 373 13. Shahraki M., Z., & Mao X., 2022, Biochar application in biofiltration systems to remove nutrients,
374 pathogens, and pharmaceutical and personal care products from wastewater. *Journal of Environ-*
375 *mental Quality*, 51(2), 129–151. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20331>.
- 376 14. Molle P., Lienard A., Boutin C., Merlin G., Iwema A., 2005, How to treat raw sewage with constructed wet-
377 lands: an overview of the French systems: *Water Sci. Technol.*, **51**, pp. 11-21.
- 378 15. Morand N., 2007, Cahiers des Clauses Techniques Particulières (CCTP), filtres plantés de roseaux. Ministère
379 de l'agriculture et de la pêche, Lyon, France, 76 p.
- 380 16. Park J.H., Wang J.J., Meng Y., Wei Z., DeLaune R.D., Seo D.C., 2019, Adsorption/desorption behavior of
381 cationic and anionic dyes by biochars prepared at normal and high pyrolysis temperatures. *Colloids Surf. A*
382 *Physicochem. Eng. Asp.*, **572**, 274–282.
- 383 17. Rizwan M., Ali S., Qayyum M.F., Ibrahim M., Ziaurrehman M., Abbas T., Ok Y.S., 2016, Mechanisms of biochar-
384 mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: A critical review. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **23**,
385 2230–2248
- 386 18. Pignatello J.J., 2011, Interactions of Anthropogenic Organic Chemicals with Natural Organic Matter and Black
387 Carbon in Environmental Particles. *Biophysico-Chemical Processes of Anthropogenic Organic Compounds in*
388 *Environmental Systems*, Hoboken, USA, 50 p.
- 389 19. Pauwels J, Van Ranst E, Verloo M, Mvondo Ze A., 1992, Manuel de Laboratoire de Pédologie—méthodes
390 d'analyses de sols et de plantes; équipement et gestion des stocks de verrerie et de produits chimiques. Pu-
391 blications Agricoles nr. 28, A.G.C.D. Bruxelles, Belgium.
- 392 20. Tresse O., Le Bret V., Benezech T., Faille C., 2006, Comparative evaluation of adhesion,
393 surface properties, and surface protein composition of *Listeria monocytogenes* strains after cultivation at
394 constant pH of 5 and 7. *Journal of applied microbiology*, **101**(1), 53- 62.
- 395 21. Visiy E. B., Djousse B. M. K., Lekeufack M., Zangue C. N., Sangodoyin A., Gbadegesin A. S. & Fonkou T., 2022,
396 Effectiveness of biochar filters vegetated with *Echinochloa pyramidalis* in domestic wastewater treatment.
397 *Water Science and Technology*, **85**(9), 2613–2624.

- 398 22. Xiang W., Zhang X., Chen J., Zou W., He F., Hu X., Tsang D. C. W., Ok Y. S., & Gao B., 2020, Biochar
399 technology in wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere* (Vol. 252), 1-14. Elsevier Ltd.
400 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126539>
- 401 23. Yang W., Wang Z., Song S., Han J., Chen H., Wang X., Sun R., Cheng J., 2019, Adsorption of copper (II) and
402 lead (II) from seawater using hydrothermal biochar derived from Enteromorpha. *Mar. Pollut. Bull.*, **149**, 110-
403 586.
- 404 24. Zhou X., Wang X., Zhang H., Wu H., 2017, Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using
405 a biochar-amended aerated vertical flow constructed wetland, *Bioresource Technology* consulté le 15 Mai
406 2019 sur: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.072>
- 407 25. Zulfiqar M., Samsudin M.F.R., Sufian S., 2019, Modelling and optimization of photocatalytic degradation of
408 phenol via TiO₂ nanoparticles: An insight into response surface methodology and artificial neural network. *J.*
409 *Photoch. Photobio.*, **384**, 112-398.