

ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DU VETIVER ET DU TYPHA POUR LE TRAITEMENT D'EFFLUENTS PRETRAITES DANS UNE FOSSE SEPTIQUE EN MILIEU RURAL A L'AIDE D'UN REACTEUR BIOLOGIQUE A FLUX HORIZONTAL

Abdou Khafor Ndiaye.¹, Falilou Coundoul.², Abdoulaye Deme.³, Antonina Torrens Armengol⁴.

¹Université Gaston Berger, Saint-Louis du Sénégal, ndiaye.abdou-khafor@ugb.edu.sn

²Université Gaston Berger, Saint-Louis du Sénégal, falilou.coundoul@ugb.edu.sn

³Université Gaston Berger, Saint-Louis du Sénégal, abdoulaye.deme@ugb.edu.sn

⁴University of Barcelona, Espagne, antoninatorrens@ub.edu

INFOS SUR L'ARTICLE

Historique de l'article:

Reçu le : 7 janvier 2024

Reçu en format révisé le : 01 aout 2024

Accepté le : 14 aout 2025

Mots-Clés :

- Filtres plantés de Typha et Vétiver
- Traitement écologique des eaux usées
- Efficacité des réacteurs biologiques à flux horizontal
- Réduction des polluants (DCO, DBO₅, MeS)
- Systèmes de traitement des eaux usées en milieu rural

ABSTRACT

This article explores the ecological treatment of pre-treated effluents from a septic tank at a rural site equipped with a horizontal flow biological reactor. The main objective of the study is to compare the efficiency of two filter bed cells using different plants, Vetiver and Typha, while identifying sustainable solutions tailored to the needs of rural school settings. The methodology combines field surveys to understand the specific conditions of the site with laboratory analyses to assess the pollutant load of the water before and after treatment. The results show that both filters are effective for most of the parameters studied, including chemical oxygen demand (COD) and five-day biochemical oxygen demand (BOD₅). Vetiver exceeded expectations by removing more COD, reaching an average effluent concentration of 74 mg/L, compared to 155 mg/L for Typha. The latter proved to be more effective in filtering suspended solids (SS), with an average concentration of 1 mg/L, compared to 3 mg/L for Vetiver. Both filters surpassed target values for several parameters, including the reduction of faecal coliforms (FC). However, further optimisation is required for phosphate treatment. In conclusion, both filtration systems are effective and suitable for treating pre-treated effluents in rural areas. Vetiver and Typha offer specific advantages, and their combined use could enhance the robustness and efficiency of treatment systems. The findings highlight the need for further research to optimise these ecological systems, particularly for phosphate removal.

INTRODUCTION

Le Sénégal s'est engagé, comme de nombreux pays, à atteindre les objectifs de développement durable (ODD) définis par l'Assemblée générale des Nations Unies en 2015 (Desa U. N. 2016). La politique d'assainissement du Sénégal (2016-2025) vise explicitement à contribuer à la réalisation des ODD, en particulier à assurer l'accès universel à l'eau potable et à l'assainissement d'ici 2030, tout en garantissant une gestion intégrée et durable des ressources en eau. Cette politique met l'accent sur les éléments clés de l'ODD 6, notamment : (i) l'accès des ménages à un assainissement durable, (ii) la gestion des eaux usées et des eaux pluviales, et (iii) l'éradication de la défécation en plein air. Cependant, lorsqu'on confronte cette volonté à la réalité sur le terrain, il subsiste un écart

significatif. En 2021, environ 56 % de la population sénégalaise avaient accès à des services d'assainissement améliorés, tels que des toilettes raccordées à un système d'évacuation des eaux usées. Cela signifie qu'une grande partie de la population n'a toujours pas accès à des installations d'assainissement adéquates. Les réseaux d'assainissement, tels que les égouts, restent limités, en particulier dans les zones rurales, où la majorité des systèmes sont concentrés dans les zones urbaines, notamment à Dakar.

Le traitement des eaux usées au Sénégal est encore insuffisant, avec des infrastructures principalement présentes dans les grandes villes, tandis que les zones rurales en sont largement dépourvues. Cela entraîne une pollution des cours d'eau et des nappes phréatiques par des eaux usées non traitées. Le gouvernement sénégalais a,

depuis plus d'une décennie, pris des mesures pour améliorer l'assainissement, notamment avec le lancement du Programme d'Assainissement du Millénaire (PAM) en 2009, suivi du Plan National d'Assainissement (PNA) qui vise à renforcer la gestion des eaux usées et à développer les infrastructures. De plus, le Sénégal bénéficie du soutien d'organisations internationales, telles que la Banque mondiale (BM) et la Banque africaine de développement (BAD), ainsi que d'ONG, qui collaborent pour renforcer les capacités du secteur de l'assainissement.

Malgré ces efforts, des défis demeurent, en particulier en milieu rural, où l'assainissement reste insuffisant (Prüss-Ustün et al. 2017). Des méthodes alternatives de traitement, telles que les filtres plantés de roseaux, ont montré leur efficacité dans divers contextes, y compris dans les pays en développement (Vymazal 2011). Cependant, leur application nécessite une adaptation locale spécifique, surtout en ce qui concerne la gestion durable des eaux usées, particulièrement dans les régions où les ressources en eau sont limitées.

C'est dans ce contexte que notre étude propose une innovation : un système écologique de traitement des effluents prétraités par une fosse septique, en milieu rural. Contrairement à des études antérieures qui se concentrent sur les eaux usées brutes, notre approche met l'accent sur l'amélioration des performances de traitement des effluents issus de fosses septiques. En effet, la fosse septique joue un rôle clé dans la réduction des charges polluantes, ce qui est essentiel pour garantir un traitement efficace en aval. Dans certains cas, une fosse septique bien dimensionnée permet d'infiltrer les eaux dans le sol, mais notre étude vise à aller plus loin en améliorant encore la qualité des eaux traitées pour d'éventuelles réutilisations, notamment dans un contexte scolaire rural.

Le système que nous avons expérimenté repose sur deux cellules de lit filtrant, utilisant respectivement le Vétiver (*Chrysopogon zizanioides*) et le Typha (*angustifolia*), deux plantes reconnues pour leurs capacités épuratoires (Abaga, Dousset, et Munier-Lamy 2021 ; Roongtanakiat 2009 ; Golabi et al. n.d.). Bien que les performances du Typha et du Vétiver pour le traitement des eaux usées soient déjà bien documentées, notre étude se distingue par une comparaison directe de ces deux plantes dans des conditions identiques, appliquées à des effluents prétraités, ce qui constitue une plus-value notable.

L'objectif principal de cette étude est donc de comparer l'efficacité de ces deux plantes pour améliorer la qualité des eaux issues des fosses septiques, et de formuler des recommandations pour des solutions durables adaptées aux besoins locaux, en particulier pour des établissements scolaires en milieu rural. Cette démarche est d'autant plus pertinente qu'elle se concentre sur l'amélioration du traitement dans un contexte spécifique, tout en tenant compte du rôle important de la fosse septique en amont.

Les étapes clés de notre démarche comprennent :

- Une investigation sur le terrain pour appréhender les spécificités du site ;
- L'analyse en laboratoire des échantillons d'eaux usées pour mesurer la charge polluante ;
- Le suivi de la qualité des eaux traitées par le réacteur biologique ;
- Une étude comparative des performances des cellules utilisant le Vétiver et le Typha.

La structure de cet article est organisée comme suit : la section 2 expose notre méthodologie, la section 3 présente les résultats obtenus, la section 4 en discute les implications, et la section 5 conclut en formulant des recommandations pour des travaux futurs.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODE

1.1. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Ndiébène Gadiol est une commune du Sénégal située à 20 kilomètres de la ville de Saint-Louis, sur la Grande-Côte, non loin de l'embouchure du fleuve Sénégal. Elle fait partie de l'arrondissement de Rao, du département de Saint-Louis, et de la région éponyme. De par sa position géographique, Ndiébène Gadiol se trouve au cœur de la région historique du Gadiol. Depuis 2014, avec l'adoption de l'Acte 3 de la décentralisation, Ndiébène Gadiol est devenu le chef-lieu de la commune de Gadiol.

Notre étude porte sur l'école de Ndiébène Gadiol 1, équipée d'un réacteur biologique à flux horizontal pour traiter les eaux usées issues d'une fosse septique. Ce dernier comprend deux cellules de lit filtrant de dimensions 12x8,5 m chacune. Un réservoir est également prévu pour recueillir les eaux traitées. Bien que les deux cellules aient des dimensions identiques, elles diffèrent par les plantes utilisées pour le traitement : l'une utilise du Vétiver et l'autre du Typha. La localisation de l'établissement est illustrée sur la Figure 1.

L'école accueille 505 élèves, âgés de 7 à 14 ans, répartis dans 12 salles de classe. En dépit de cet effectif, elle ne dispose que de 4 latrines destinées aux élèves et d'une pour les enseignants. Ces latrines sont à chasse d'eau et connectées à la fosse septique. Cependant, l'école ne dispose d'aucun point d'eau à proximité immédiate, ce qui soulève une question importante concernant la provenance des eaux usées. Les latrines fonctionnent grâce à un approvisionnement temporaire en eau, provenant d'un puits situé à environ 500 mètres de l'école. L'eau est transportée manuellement, ce qui explique la faible quantité d'eaux usées générées. Le système d'assainissement de l'école est considéré comme non conforme aux standards en vigueur.



Figure 1: localisation du site étudié : l'école Ndiegène Gadiol

1.2. DESCRIPTION DU FILTRE

Le réacteur biologique à flux horizontal, qui désigne l'ensemble des lits plantés précédés de la fosse septique, est illustré en 3D dans la Figure 2 et une vue en profil du filtre est présentée sur la Figure 3. Chaque filtre est composé de deux cellules de lit filtrant, chacune mesurant 12x8,5 m. La fosse septique précède ces filtres et joue un rôle crucial dans la réduction initiale de la charge polluante. Bien que certaines fosses septiques bien dimensionnées puissent permettre une infiltration directe des eaux dans le sol via des tranchées ou des puisards, notre étude a mis en place ce système de filtration

supplémentaire pour améliorer la qualité de l'eau, particulièrement en termes de réduction des matières en suspension, des nutriments, et des pathogènes, dans une optique de réutilisation pour l'irrigation agricole.

Le système comprend deux types de matériaux filtrants : à l'entrée et à la sortie des cellules, une couche de gros graviers (40-80 mm) est utilisée pour couvrir les tuyaux de distribution et de récupération des effluents. Entre ces couches, une autre couche de graviers plus fins (5-15 mm) assure la filtration. Les caractéristiques générales du filtre sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques générales du filtre

Cellules	Dimension des cellules	Hauteur des cellules	Matériau filtrant	Granulométrie à l'entrée et à la sortie des cellules	Granulométrie au milieu des cellules	Plantes
FHT	12x8,5 m	70	Silex	40 - 80 mm	5 - 15 mm	Typha
FHV	12x8,5 m	70	Silex	40 - 80 mm	5 - 15 mm	Vetiver

La répartition de l'effluent dans les filtres est cruciale pour garantir un flux homogène entre les deux cellules, évitant ainsi toute variation de performance entre les plantes. L'effluent provenant de la fosse septique est distribué de manière égale sur les deux lits filtrants à l'aide de tuyaux perforés qui permettent un flux régulier et constant. Cette répartition est vérifiée régulièrement pour s'assurer que les conditions hydrauliques sont identiques dans les deux cellules.

Le temps de séjour des eaux usées dans les filtres est un facteur important pour l'efficacité du traitement. Dans ce système, le temps de séjour hydraulique moyen est de 5 jours, ce qui permet un traitement suffisant pour la dégradation des matières organiques, la filtration des particules solides, et la réduction des polluants microbiologiques.

L'objectif de ce système de filtration est d'améliorer la qualité des eaux issues de la fosse septique, en vue de leur

valorisation par réutilisation pour l'irrigation agricole à proximité de l'école. Ce complément de traitement permet de garantir que l'eau atteigne des standards de qualité élevés, notamment en termes de matières en suspension (MeS), de nutriments (azote et phosphore), et de pathogènes (coliformes fécaux). La fosse septique, bien qu'effectuant déjà un premier traitement, ne permet pas à elle seule de respecter les normes de réutilisation agricole, d'où la nécessité de ce traitement complémentaire.

Les eaux usées traitées par ce système proviennent exclusivement des latrines de l'école, alimentées par l'eau collectée manuellement. Il s'agit principalement d'eaux vannes, provenant des toilettes, ce qui justifie la mise en place d'un système de traitement suffisamment performant pour éliminer les pathogènes et réduire la charge polluante avant toute réutilisation.

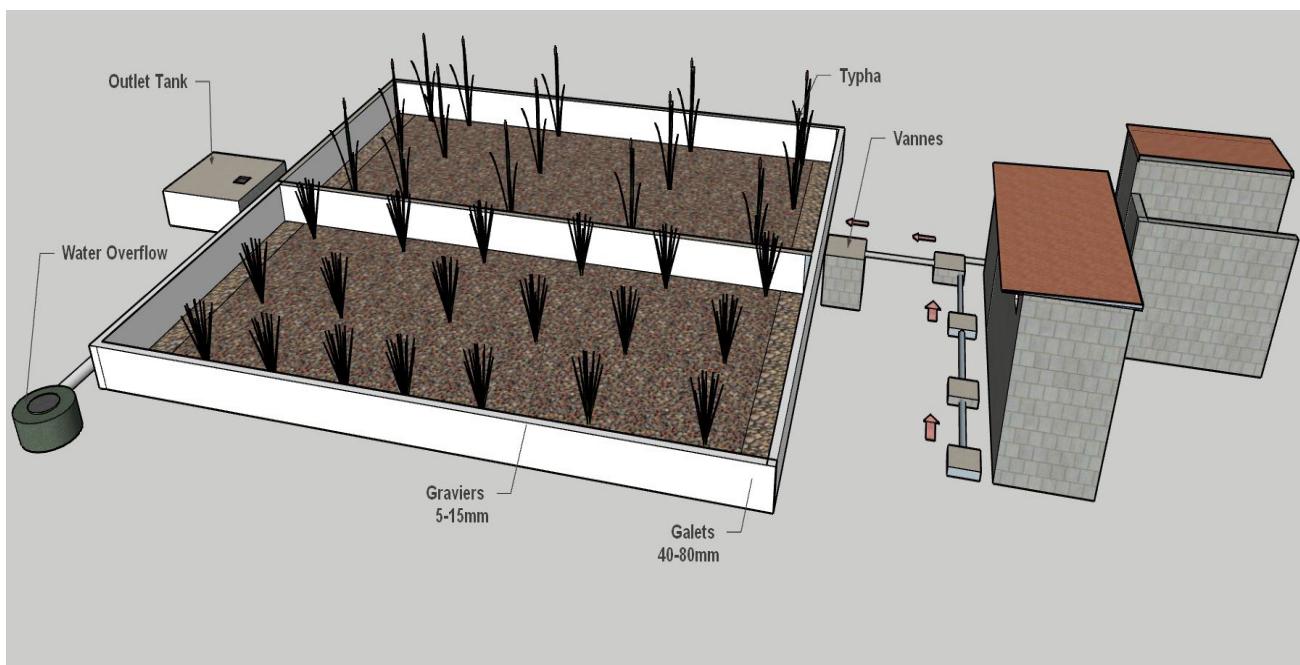


Figure 2 : Plan 3D du filtre

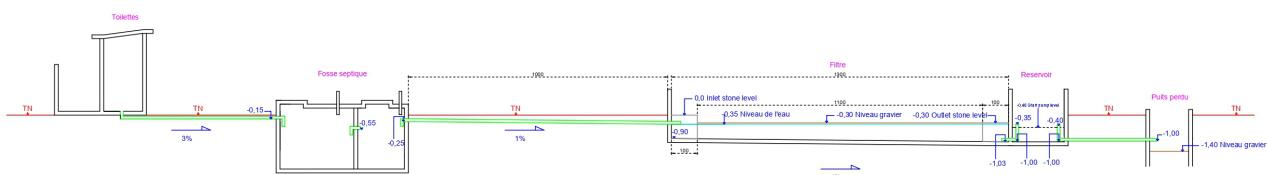


Figure 3: Vue de profil du filtre

1.3. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

1.3.1. PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS

Afin de déterminer la qualité des eaux à l'entrée et à la sortie des filtres, un programme de prélèvements a été établi, comme présenté dans le Tableau 2. Les paramètres physico-chimiques et microbiologiques ont été choisis en fonction des normes de rejet au Sénégal. Ces normes fixent des seuils de qualité pour les eaux usées traitées, notamment en ce qui concerne la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène sur cinq jours (DBO_5), les matières en suspension (MeS), les nutriments tels que les phosphates (PO_4^{3-}) et l'ammonium (NH_4^+), ainsi que les coliformes fécaux (CF) et les œufs d'helminthes (EH). Ces paramètres sont essentiels pour évaluer l'efficacité du traitement et garantir que l'eau rejetée soit conforme aux exigences réglementaires.

Cependant, tous les paramètres de rejet au Sénégal n'ont pas été retenus dans cette étude. Le choix des paramètres s'est concentré sur ceux qui sont les plus pertinents pour les systèmes de filtration à écoulement horizontal en milieu rural, ainsi que ceux qui influencent directement la

réutilisation des eaux pour l'irrigation agricole, ce qui constitue l'objectif final de ce traitement.

Les quantités d'effluent arrivant sur chaque filtre ont également été mesurées. En moyenne, chaque filtre a reçu environ 300 litres d'effluents par jour, ce qui correspond à la production quotidienne des latrines de l'école. Ce débit est réparti de manière équitable entre les deux cellules à l'aide de tuyaux de distribution perforés, garantissant ainsi une homogénéité dans le flux d'entrée des eaux usées.

Les paramètres sélectionnés dans cette étude, présentés dans les Tableau 4 et Tableau 5, ont été choisis en fonction de leur pertinence pour évaluer la performance du système de filtration en milieu rural et leur impact sur la réutilisation des eaux pour l'irrigation. Les matières en suspension (MeS), la DCO et la DBO_5 sont des indicateurs cruciaux de la qualité de l'eau en termes de matières organiques et solides présentes dans les effluents. Les concentrations de nutriments tels que l'ammonium (NH_4^+), les nitrates (NO_3^-), et les phosphates (PO_4^{3-}) sont essentielles pour éviter l'eutrophisation des sols lors de la réutilisation des eaux.

Les coliformes fécaux et les œufs d'helminthes, quant à eux, sont des indicateurs microbiologiques qui déterminent la sécurité sanitaire des eaux traitées, particulièrement pour une réutilisation en agriculture, où la

contamination par des pathogènes doit être réduite à un niveau acceptable pour éviter tout risque de transmission de maladies.

Tableau 2: Périodes d'échantillonnage

Nº campagne d'échantillonnage	Date	Point d'échantillonnage	Localisation des points d'échantillonnage
1	mi-février	4	Entrée fosse septique, sortie fosse septique, sortie FHT, sortie FHV,
2	fin février	4	Entrée fosse septique, sortie fosse septique, sortie FHT, sortie FHV
3	mi-mars	3	Sortie fosse septique, sortie FHT, sortie FHV
4	mi-avril	3	Sortie fosse septique, sortie FHT, sortie FHV
5	mi-mai	3	Sortie fosse septique, sortie FHT, sortie FHV
6	mi-juin	4	Entrée fosse septique, sortie fosse septique, sortie FHT, sortie FHV

Tableau 3: Paramètres recherchés par campagne d'échantillonnage

Nº campagne d'échantillonnage	MeS	DCO	DBO ₅	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	PT	PO ₄ ³⁻	Coliformes fécaux(CF)	œufs d'helminthe(EH)	pH	CE
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x		x	x	x		x	x		x	x
3	x	x	x	x				x			
4	x	x	x					x			
5	x	x	x	x			x	x	x		
6	x	x	x	x		x	x	x		x	x

Paramètres microbiologiques

Tableau 4: Paramètres microbiologiques

Nº campagne d'échantillonnage	Coliformes fécaux(CF)	œufs d'helminthe(EH)
1	x	x
2	x	
3	x	
4	x	
5	x	x
6	x	

Tableau 5: Paramètres physico-chimiques

Nº campagne d'échantillonnage	MeS	DCO	DBO ₅	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	PT	PO ₄ ³⁻	pH	CE
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x		x	x	x		x	x	x
3	x	x	x	x					
4	x	x	x						
5	x	x	x	x					
6	x	x	x	x		x	x	x	x

1.3.2. ANALYSE DES ÉCHANTILLONS

Conformément au calendrier du Tableau 2, un programme de surveillance a été établi, comme détaillé dans le Tableau 3. Ce programme impliquait la collecte d'échantillons, leur préservation, et leur stockage selon les méthodes standards internationales (Bridgewater et al. 2017). Les échantillons ont été transportés au laboratoire dans des conteneurs stériles réfrigérés pour préserver leur intégrité.

Toutes les mesures *in situ* du pH, de la conductivité électrique (EC) et de la température (T) ont été effectuées à l'aide d'un seul appareil multifonction, le testeur HANNA HI98304. Ce conductimètre portable effectue simultanément les trois mesures, garantissant une grande fiabilité et une cohérence dans les résultats obtenus. Il dispose d'une électrode en graphite non oxydable pour mesurer la conductivité, avec une plage de mesure de 0,00 à 19,99 mS/cm, et une compensation automatique de la température. La précision est de $\pm 2\%$ pour la conductivité avec une résolution de 0,01 mS/cm, tandis que la température est mesurée avec une précision de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Ce dispositif est utilisé couramment pour des applications telles que le traitement des eaux usées, l'agriculture, et l'aquaculture (Hanna Instruments 2023).

L'analyse des paramètres de qualité de l'eau, comprenant la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biologique en oxygène sur cinq jours (DBO₅), les matières en suspension (MeS), l'ammonium ((N – NH₄⁺)), les nitrates (N – NO₃⁻), et les phosphates ((P – PO₄³⁻)), a été réalisée selon les méthodes standards (Bridgewater et al. 2017). Les échantillons ont été analysés au Laboratoire de Traitement des Eaux Usées et de Pollution de l'Eau (LATEU), affilié à l'Université Cheikh Anta Diop à Dakar, Sénégal. Ces paramètres sont essentiels pour évaluer l'efficacité du traitement et la conformité aux normes de rejet des eaux usées au Sénégal, notamment dans le cadre de la réutilisation des eaux pour l'irrigation.

Pour l'évaluation des coliformes fécaux (CF), la méthode standard utilisant l'agar lactose rouge violet (VRBL) a été appliquée conformément aux normes NF ISO 4832 (Juillet 2006), qui spécifie une méthode horizontale pour le dénombrement des coliformes par comptage des colonies à 30°C. Les résultats ont été exprimés en unités formant colonies (UFC) par unité de volume (\log_{10} UFC/mL). D'autres normes associées à cette méthode incluent NF V 08-050 (Février 1999) et NF V 08-060 (Mars 1996), qui traitent respectivement du dénombrement des coliformes à 30°C et 44°C. La quantification des œufs d'helminthes a été effectuée en suivant les méthodes standardisées par l'OMS (World Health Organization 2017), consistant en l'isolement des œufs par filtration et leur comptage au microscope.

1.3.3. TRAITEMENT DES DONNÉES

Les analyses statistiques ont été réalisées sur les données brutes en utilisant les logiciels statistiques Excel 2016 et IBM-SPSS Statistics pour Windows (Anon n.d.). Excel

2016 a été utilisé pour les statistiques descriptives (moyennes, maximum, minimum et écart type). SPSS 24 a été utilisé pour une analyse de variance (ANOVA). L'analyse de variance a été réalisée pour évaluer l'influence de différentes variables de conception et opérationnelles sur l'élimination des polluants. Une signification statistique a été établie à $p \leq 0,05$.

2. RÉSULTATS

2.1. QUALITÉ DES EAUX USÉES

Le Tableau 6 présente les résultats de la qualité de l'eau à différentes étapes du processus de traitement : à l'entrée de la fosse septique, à la sortie de la fosse septique, à la sortie du filtre Typha (FHT) et à la sortie du filtre Vétiver (FHV). Les paramètres étudiés comprennent la DCO, la DBO₅, les MeS, les concentrations d'ammoniac (N – NH₄⁺), de nitrate (N – NO₃⁻), et de phosphate (P – PO₄³⁻), le pH, la conductivité électrique (CE), le nombre de coliformes fécaux en (UFC) et leur logarithme (\log_{10} UFC), ainsi que la présence d'œufs d'helminthes (OH). Pour chaque paramètre et chaque étape du traitement, le Tableau 6 indique la valeur moyenne (Moy), ainsi que les valeurs maximales (Max) et minimales (Min) enregistrées, le cas échéant.

2.1.1. QUALITE DES EAUX USEES TRAITEES PAR LE FILTRE VETIVER (FHV)

Le Tableau 6 montre une amélioration notable de la qualité de l'eau après son passage à travers le FHV. Initialement, les valeurs de DCO et de DBO₅ à l'entrée de la fosse septique sont respectivement de 1347 mg/L et 259 mg/L. Après le traitement par la fosse, ces valeurs diminuent drastiquement pour atteindre 291 mg/L et 78 mg/L, respectivement. Ensuite, après le passage à travers le FHV, on observe une baisse encore plus marquée, avec des valeurs moyennes de 74 mg/L pour la DCO et 11 mg/L pour la DBO₅. Concernant les MeS, on constate une diminution significative de 76 mg/L à 35 mg/L après la fosse septique, et une réduction importante à seulement 3 mg/L après le FHV. Les concentrations d'ammonium (N – NH₄⁺) et de nitrate (N – NO₃⁻) montrent également une tendance à la baisse après chaque étape de traitement. En particulier, la concentration d'ammonium diminue de 248 mg/L à 53 mg/L après la fosse septique et atteint 7 mg/L après le filtre vétiver. La concentration de phosphate (P – PO₄³⁻) présente une diminution marquée de 48 mg/L à 47 mg/L après la fosse septique, mais c'est après le passage à travers le FHV que sa concentration chute drastiquement à 4,5 mg/L. Sur le plan microbiologique, la concentration des coliformes fécaux diminue considérablement de 5,9 \log_{10} UFC/100 mL à 4,6 \log_{10} à la sortie de la fosse septique, et atteint une valeur aussi basse que 2,2 \log_{10} après le traitement par le FHV. Il est également à noter que les œufs d'helminthes, en particulier les larves d'anguillules, ne sont pas détectés à la sortie du filtre.

2.1.2. QUALITE DES EAUX USEES TRAITEES PAR LE FILTRE TYPHA (FHT)

Le Tableau 6 détaille en outre les changements de qualité de l'eau après son passage dans le FHT. À l'entrée, la concentration moyenne de la DCO est de 1347 mg/L. Suite au passage à travers le FHT, elle descend à 155 mg/L, variant entre 48 mg/L et 358 mg/L. Pour la DBO5, elle passe de 259 mg/L initialement à 8 mg/L après filtration par le FHT, se situant entre 6 mg/L et 11 mg/L. Les MeS sont réduites de 76 mg/L en moyenne à 1 mg/L, avec une amplitude de 1 à 3 mg/L. L'ammonium, représenté par ($N - NH_4^+$), baisse d'une moyenne de 248 mg/L à 8 mg/L, fluctuant de 0 à 2 mg/L. Les nitrates ($N - NO_3^-$)

maintiennent une moyenne stable de 30 mg/L après la fosse et le filtre. Les phosphates ($P - PO_4^{3-}$) chutent de 48 mg/L à 8,6 mg/L après filtration. Concernant le pH, il commence à 8,2, augmente légèrement à 8,5, puis retombe à 7,9 après passage dans le FHT. La conductivité, notée CE, débute à 2950, monte à 3400 puis redescend à 1710. Enfin, les Coliformes Fécaux se situent à 8,30E+05 UFC (100 mL) à l'entrée, passent à 3,80E+04 UFC (100 mL) et s'établissent à 170 UFC (100 mL) après le filtre, avec une variation de 0 à 300 UFC. Le Log₁₀ de ces coliformes diminue de 5,9 à 2,2 en passant par 4,6. Les œufs d'helminthes ne sont pas observés à la sortie du FHT.

Tableau 6: Résultats de la qualité de l'eau

Paramètre	Entrée fosse septique	Sortie fosse septique			Sortie filtre Typha (FHT)			Sortie filtre Vetiver (FHV)		
		Moy	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
DCO (mg/L)	1347	291	500	186	155	358	48	74	149	35
DBO5 (mg/L)	259	78	101	59	8	11	6	11	20	7
MeS (mg/L)	76	35	40	33	1	3	1	3	6	0
$N - NH_4^+$ (mg/L)	248	53	146	15	8	2	0	7	20	0
$N - NO_3^-$ (mg/L)	30	30			15			27		
$P - PO_4^{3-}$ (mg/L)	48	47			8,6			4,5		
pH	8,2	8,5			7,9			7,9		
CE	2950	3400			1710			1870		
C Fécaux UFC (100 mL)	8,30E+05	3,80E+04	5,40E+04	2,30E+04	170	300	0	180	330	0
C Fécaux (Log ₁₀)	5,9	4,6	4,7	4,4	2,2	2,5	0	2,2	2,5	0
Œufs helminthe (Larves Anguillules)		0			0			0		

2.2. PERFORMANCE DES FILTRES

Le Tableau 7 illustre les pourcentages d'élimination de divers polluants essentiels, obtenus grâce à la station de traitement dans son ensemble, ainsi qu'aux FHT et FHV,

Tableau 7: Taux d'élimination des polluants plus importants par les filtres (%), calculés sur les valeurs moyennes

Paramètre	Taux élimination total (Fosse + filtre)	Taux élimination filtre Typha	Taux élimination filtre Vétiver
DCO	91,50	46,74	74,57
DBO5	96,30	89,70	85,90
MeS	97,20	96,30	91,40
$N - NH_4^+$	97,00	85,20	86,70
C Fécaux (ULog réduction)	3,7	2,4	2,3

offrant ainsi un aperçu précis de l'efficacité des filtres plantés à base de Typha et de Vétiver, mettant en lumière les performances spécifiques de chaque système en matière d'élimination des polluants.

Le Tableau 8 compare les performances des deux filtres aux valeurs cibles pour les principaux paramètres de qualité de l'eau. Les performances des filtres Typha et Vétiver sont évaluées en fonction de leur efficacité à atteindre les objectifs réglementaires pour la DBO5, la DCO, les MeS, les nitrates, les phosphates et les coliformes fécaux.

Tableau 8: Comparaison des performances des filtres

Paramètre	Valeur Cible	Performance Typha	Performance Vétiver	Conclusion
DBO5 (mg/L)	< 25	8	11	Les deux filtres sont efficaces
DCO (mg/L)	< 125	155	74	Vétiver plus efficace
MeS (mg/L)	< 35	1	3	Les deux filtres sont très efficaces
Nitrates (mg/L)	< 50	15	27	Les deux filtres sont efficaces
Phosphates (mg/L)	< 2	8,6	4,5	Aucun filtre n'atteint la valeur cible
Coliformes fécaux (UFC/100 mL)	< 1000	170	180	Les deux filtres sont très efficaces

2.2.1. PERFORMANCE DU FHT

Dans le Tableau 7, le filtre Typha a montré des capacités de traitement notables pour l'ensemble des paramètres étudiés. En particulier, la DBO5 a été réduite de manière significative, avec un taux d'élimination de 89,70 %, reflétant une bonne capacité de dégradation des matières organiques biodégradables. Les MeS ont également été efficacement éliminées à hauteur de 96,30 %, indiquant un potentiel élevé de filtration des particules solides. Toutefois, le taux d'élimination de la DCO s'est avéré inférieur, atteignant 46,74 %, suggérant que le filtre Typha est moins efficace pour la réduction des charges organiques totales. Concernant l'élimination de l'ammonium, une réduction de 85,20 % a été observée, ce qui reflète des conditions favorables pour l'absorption et la transformation des nutriments. Enfin, la réduction logarithmique des coliformes fécaux a été estimée à 2,4 unités log, indiquant une efficacité modérée dans l'élimination des pathogènes.

2.2.2. PERFORMANCE DU FHV

Dans le Tableau 7, le filtre Vétiver a démontré une performance supérieure à celle du FHT pour la majorité des paramètres étudiés. Le taux d'élimination de la DCO a atteint 74,57 %, soulignant une capacité accrue du système racinaire du Vétiver à décomposer les matières organiques complexes. La DBO5 a été réduite de 85,90 %, un résultat similaire à celui du filtre Typha, ce qui montre que les deux filtres sont comparables en termes de réduction des matières biodégradables. En revanche, pour les MeS, le FHV a enregistré un taux d'élimination de 91,40 %, légèrement inférieur à celui du FHT, mais restant dans des niveaux d'efficacité élevés. L'élimination de l'ammonium a été légèrement supérieure à celle du FHT, avec un taux de 86,70 %, montrant des performances comparables dans l'absorption des nutriments. Enfin, la réduction des coliformes fécaux par le filtre Vétiver a été de 2,3 unités log, proche de celle observée avec le filtre Typha.

3. DISCUSSION

3.1. PERFORMANCE DU FILTRE PLANTE DE VETIVER

L'analyse des résultats obtenus avec le filtre planté de Vétiver (FHV), comme le montrent les Tableaux 4 et 5, démontre clairement une amélioration significative de la qualité de l'eau, notamment en ce qui concerne l'élimination des polluants. En comparaison avec d'autres systèmes de traitement des eaux usées, notamment ceux étudiés par Aregu et al. (2021) dans des zones humides construites avec substrat de pierre ponce pour traiter les eaux usées industrielles, notre étude met en lumière une efficacité similaire du Vétiver dans des contextes à haute charge polluante, bien que le type de substrat utilisé diffère.

En ce qui concerne la DCO, qui est un indicateur de la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques, le filtre Vétiver a permis une réduction substantielle, passant de 1347 mg/L à 74 mg/L. Cette performance est non seulement comparable, mais elle reflète également l'efficacité observée par Aregu et al. (2021) pour le traitement des eaux usées de tanneries, où des taux d'élimination de 96,91 % ont été obtenus avec des substrats différents. La réduction de la DBO5, de 259 mg/L à 11 mg/L, vient également confirmer l'efficacité du Vétiver dans la réduction de la matière organique biodégradable, un résultat conforme aux travaux de Badejo et al. (2018), qui ont constaté une élimination de plus de 80 % de la DBO5 dans des zones humides à flux vertical utilisant *Vetiveria zizanioides*. Ainsi, ces résultats, qui dépassent souvent les valeurs réglementaires de nombreux systèmes, illustrent bien l'excellente capacité du Vétiver à traiter les eaux usées.

Par ailleurs, en ce qui concerne les Matières en Suspension (MeS), la réduction observée, passant de 76 mg/L à 3 mg/L, souligne efficacement la capacité du filtre à capturer et retenir les particules solides. Cette performance est similairement comparable à celle obtenue par Dhanya et Jaya (2013), qui ont observé une réduction supérieure à 50

% des MeS après 15 jours de traitement des eaux usées avec *Vetiveria zizanioides* dans des systèmes de zones humides construites. De plus, selon les normes définies par Bourrier, Satin, and Selmi (2010), cette concentration est bien en dessous de la valeur limite de 35 mg/L, plaçant ainsi le filtre Vétiver parmi les systèmes les plus performants en termes de filtration des particules solides. Le filtre a également démontré une efficacité notable dans la réduction des concentrations d'ammonium ($N - NH_4^+$), passant de 248 mg/L à 7 mg/L. Cette réduction est conforme à la norme de 30 mg/L définie par Bourrier et al. (2010) et montre clairement que le filtre prévient efficacement l'accumulation de nutriments pouvant conduire à l'eutrophisation. En outre, Badejo et al. (2018) ont également mis en évidence des réductions significatives d'ammonium dans les zones humides à flux vertical plantées de Vétiver, ce qui souligne la capacité de cette plante à absorber les nutriments de manière efficace. Néanmoins, le traitement des phosphates s'avère moins performant, avec une concentration post-traitement de 4,5 mg/L, dépassant la norme de 2 mg/L. Cette performance moindre pourrait être liée à des limitations spécifiques de la capacité d'adsorption du gravier de silex utilisé comme support filtrant, comme l'ont rapporté Johansson and Gustafsson (2000) et Drizo et al. (2006), qui ont constaté que certains substrats atteignent un point de saturation pour l'adsorption des phosphates.

Du point de vue microbiologique, la réduction des coliformes fécaux est également significative, avec une diminution de $5,9 \log_{10}$ à $2,2 \log_{10}$, respectant ainsi la norme de 1000 UFC/100 mL après traitement. Ces résultats confirment que l'eau traitée est adaptée à une réutilisation sécurisée, notamment à des fins agricoles, comme cela a également été observé dans les systèmes étudiés par Dhanya et Jaya (2013), qui ont démontré une réduction significative des agents pathogènes dans les eaux usées traitées par Vétiver.

Les performances observées pour certains paramètres peuvent être expliquées par les caractéristiques du système racinaire du Vétiver. En effet, le système racinaire dense et profond favorise une aération et une activité microbienne accrues, ce qui explique la réduction efficace de la DCO et de la DBO5. Aregu et al. (2021) ont également souligné que la structure racinaire du Vétiver, lorsqu'il est utilisé dans des substrats comme la pierre ponce, permet une meilleure biodégradation des composés organiques dans des contextes industriels à haute charge. De ce fait, ces résultats confirment la capacité du Vétiver à traiter efficacement les eaux usées dans divers contextes. La capacité du filtre à réduire les MeS et les coliformes fécaux peut être attribuée à la morphologie racinaire du Vétiver, qui favorise la rétention des particules solides et des agents pathogènes. Cette efficacité de filtration physique est renforcée par l'utilisation du gravier de silex comme support filtrant, qui permet de capturer les particules en suspension de manière optimale, comme l'ont montré Arias, Del Bubba, et Brix (2001). Dhanya et Jaya (2013) ont également constaté une amélioration significative de la qualité de l'eau traitée par le Vétiver, en particulier dans la réduction des coliformes fécaux, indiquant une application prometteuse pour des usages agricoles sûrs.

Cependant, l'élimination des phosphates est un domaine où le système présente des limitations. Il est probable que le gravier de silex utilisé comme massif filtrant ne soit pas idéal pour l'adsorption des phosphates. Comme l'ont rapporté Johansson and Gustafsson (2000) et Drizo et al. (2006), le silex peut atteindre un point de saturation, réduisant ainsi son efficacité dans l'élimination de ces nutriments au fil du temps. De plus, la faible capacité d'adsorption du phosphore pourrait être influencée par des facteurs tels que la granulométrie du substrat ou des concentrations initiales élevées en phosphates (Kadlec and Wallace 2008). Une optimisation de ce paramètre pourrait passer par l'utilisation d'un substrat tel que la pierre ponce, qui a montré une meilleure capacité d'adsorption des nutriments dans l'étude d'Aregu et al. (2021).

Il est donc clair que, bien que le filtre Vétiver présente des avantages notables dans le traitement des matières organiques, des MeS, et de l'azote, une optimisation du traitement des phosphates est nécessaire. Cela pourrait impliquer l'utilisation de matériaux filtrants ayant une capacité d'adsorption plus élevée pour les phosphates ou l'ajout de dispositifs complémentaires spécifiquement conçus pour leur élimination, comme l'a démontré Aregu et al. (2021) avec l'utilisation de substrats de pierre ponce. En résumé, le filtre Vétiver avec gravier de silex offre d'excellentes performances pour la plupart des paramètres analysés. Il permet une réduction significative des matières organiques, des nutriments, et des pathogènes, mais présente des limites pour l'élimination des phosphates. Ainsi, une optimisation du système serait nécessaire pour atteindre des performances conformes aux normes pour ce paramètre. Cependant, dans l'ensemble, le système démontre un fort potentiel pour une utilisation durable dans le traitement des eaux usées.

3.2. PERFORMANCE DU FILTRE PLANTE DE TYPHA

L'analyse des résultats obtenus avec le filtre planté de Typha, basée sur les données des Tableaux 4 et 5, confirme l'efficacité du système de traitement pour plusieurs polluants. Selon les pourcentages d'élimination des principaux polluants, tels que la DBO5, les Matières en Suspension (MeS) et les coliformes fécaux, avec des taux d'élimination respectifs de 89,70 %, 96,30 %, et une réduction logarithmique de 2,4 pour les coliformes fécaux, il est clair que le système est performant. Ces résultats sont cohérents avec les conclusions de Torrens et al. (2020), qui ont montré que le Typha est particulièrement efficace dans les systèmes de traitement des eaux usées en tant que macrophyte capable d'éliminer des charges organiques importantes.

Les résultats du Tableau 6 montrent que la DBO5 à la sortie du filtre est de 8 mg/L, ce qui est bien en dessous de la valeur cible de 25 mg/L, telle que définie par Bourrier et al. (2010). Ce résultat atteste d'un traitement efficace de la matière organique biodégradable. Toutefois, la concentration moyenne de DCO, qui atteint 155 mg/L, dépasse légèrement la valeur cible de 125 mg/L. Cela indique qu'une optimisation est nécessaire pour améliorer la réduction de la DCO. Ce phénomène pourrait être lié aux caractéristiques du substrat utilisé, le gravier de silex, dont la capacité d'adsorption est relativement faible pour les

composés organiques, comme l'ont suggéré Johansson et Gustafsson (2000) dans une étude sur les substrats de filtration.

Concernant les MeS, la valeur obtenue après filtration est de 1 mg/L, largement en dessous de la valeur cible de 35 mg/L, démontrant une filtration très efficace des particules solides. Ce résultat est comparable aux observations de Ciria et al. (2005), qui ont démontré l'efficacité du *Typha latifolia* pour éliminer les matières en suspension dans des systèmes de zones humides construites. De plus, les concentrations de nitrates après traitement restent stables à 30 mg/L, bien en dessous de la limite de 50 mg/L, confirmant un traitement satisfaisant de l'azote.

En revanche, le traitement des phosphates reste problématique, avec une concentration post-traitement de 8,6 mg/L, bien supérieure à la norme de 2 mg/L. Cette inefficacité pourrait être attribuée à la faible capacité d'adsorption des phosphates par le gravier de silex, comme l'ont également constaté Robertson et Cherry (1995). L'accumulation des phosphates pourrait limiter l'efficacité du système au fil du temps, nécessitant l'utilisation d'un substrat ayant une meilleure capacité d'adsorption, comme la pierre ponce, dont l'efficacité a été démontrée par Aregu et al. (2021) dans des zones humides construites pour le traitement des eaux usées industrielles.

Les résultats obtenus pour la DBO5 et les MeS sont en accord avec les conclusions de Ciria et al. (2005), qui ont observé que le *Typha latifolia* contribue à une élimination significative de la matière organique et des solides en suspension dans des systèmes similaires. Arivoli et Mohanraj (2013) ont également rapporté des taux d'élimination comparables pour les polluants des eaux usées domestiques dans un système de marais artificiel à flux vertical basé sur *Typha angustifolia*. Ces études confirment que le *Typha* est efficace dans la réduction des matières organiques et des MeS dans des conditions hydrologiques variées.

D'autres études, telles que celle de Dobberteen et Nickerson (1991), ont montré que les zones humides artificielles plantées de *Typha* peuvent compenser la perte de fonctions écologiques des zones humides naturelles, notamment en ce qui concerne la filtration et l'absorption des nutriments. En ce sens, les résultats obtenus dans notre étude confirment l'efficacité du *Typha* pour remplir ces fonctions, en particulier dans des systèmes où la réduction des charges organiques et des coliformes est prioritaire. En ce qui concerne les nitrates, le faible changement de concentration observé après passage par le filtre planté de *Typha* peut s'expliquer par des conditions d'oxygénation limitées dans le substrat. Brix (1997) a montré que la dénitrification, un processus essentiel à la réduction des nitrates, nécessite des conditions anaérobies optimales, qui ne sont pas toujours présentes dans les systèmes à écoulement horizontal. Le gravier de silex, bien qu'efficace pour la filtration physique, présente une faible capacité d'adsorption des nitrates, comme l'ont également montré Robertson et Cherry (1995).

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le filtre planté de *Typha* est efficace pour l'élimination de la matière organique et des coliformes fécaux. Cette performance peut être attribuée à la structure racinaire

dense du *Typha*, qui favorise l'oxygénation du substrat et stimule l'activité microbienne, facilitant ainsi la dégradation de la matière organique. Ciria et al. (2005) ont également souligné que le *Typha* est capable de maintenir une activité microbienne élevée, ce qui explique ses excellents résultats pour la DBO5 et les MeS.

Cependant, l'élimination des nitrates et des phosphates s'avère moins performante, en partie en raison des propriétés du gravier de silex utilisé comme substrat filtrant. Robertson et Cherry (1995) ont montré que des substrats plus efficaces pour l'adsorption des nutriments, tels que la pierre ponce, pourraient être utilisés pour améliorer l'efficacité du système. Une autre stratégie pour améliorer l'élimination des nitrates consisterait à créer des zones anaérobies spécifiques dans le substrat, favorisant ainsi la dénitrification, comme l'ont suggéré Tiedje (1988) et Brix (1997).

De plus, l'optimisation du système pourrait passer par l'ajout de matériaux organiques au substrat pour améliorer l'adsorption des nitrates et des phosphates. Aregu et al. (2021) ont démontré que l'utilisation de substrats tels que la pierre ponce dans les zones humides construites permet d'améliorer significativement l'élimination des phosphates, suggérant que cette approche pourrait également être bénéfique dans notre système.

En conclusion, le filtre planté de *Typha* présente des performances solides pour l'élimination de la matière organique, des MeS et des coliformes fécaux, avec des résultats conformes aux normes établies pour ces paramètres. Cependant, des ajustements sont nécessaires pour améliorer l'élimination des nitrates et des phosphates. Des pistes d'amélioration incluent l'utilisation de substrats plus adaptés, tels que la pierre ponce, et la création de zones anaérobies pour favoriser la dénitrification. Dans cette optique, les résultats de cette étude apportent des contributions importantes aux stratégies d'optimisation des systèmes de zones humides construites pour le traitement des eaux usées, tout en tenant compte des caractéristiques spécifiques des sites.

3.3. ANALYSE COMPARATIVE DES FILTRES PLANTES DE VETIVER ET DE TYPHA

3.3.1. ANALYSE COMPARATIVE EN VALEURS ABSOLUES

L'examen des Tableau 6 et Tableau 7 permet de tirer plusieurs conclusions claires sur la performance comparative des filtres *Typha* et *Vétiver* dans le traitement écologique des effluents prétraités. Tout d'abord, en termes d'efficacité dans la réduction de la Demande Chimique en Oxygène (DCO), le filtre *Vétiver* se révèle plus performant, avec une concentration moyenne de sortie de 74 mg/L, contre 155 mg/L pour le filtre *Typha*. Cette différence s'explique par les caractéristiques spécifiques du système racinaire du *Vétiver*, particulièrement dense et profond, qui améliore l'aération du sol et favorise la décomposition des matières organiques. Cela correspond également aux résultats de Badejo et al. (2018), qui ont montré une réduction significative de la DCO (jusqu'à 80,65 %) en utilisant le *Vétiver* dans des zones humides à flux vertical. Ces résultats confirment que le *Vétiver* est

particulièrement efficace pour la dégradation biologique des matières organiques, ce qui explique sa supériorité dans la réduction de la DCO par rapport au Typha.

En ce qui concerne la Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours (DBO₅), les deux filtres affichent des performances similaires, bien que le Vétiver présente une légère supériorité (11 mg/L) par rapport au Typha (8 mg/L). Cette différence s'explique par la capacité du Vétiver à décomposer plus efficacement la matière organique en suspension, même si le Typha reste performant pour les substances plus facilement biodégradables. De plus, cette observation est en accord avec l'étude de Mahmoudpour et al. (2021), qui a montré que le Vétiver est capable de réduire la DBO₅ de manière significative, avec des taux d'élimination de 97 % dans des systèmes de zones humides flottantes.

Concernant les matières en suspension (MeS), le Typha se montre supérieur avec une concentration de sortie de 1 mg/L contre 3 mg/L pour le Vétiver. Cette efficacité s'explique par la morphologie du Typha, qui présente un système racinaire plus étendu à la surface, facilitant la filtration mécanique des particules solides. En effet, l'étude de Ciria et al. (2005) soutient cette conclusion en montrant que le *Typha latifolia* est particulièrement efficace pour retenir les matières en suspension et les solides organiques. Ainsi, la capacité du Typha à capturer les particules solides dans son système racinaire contribue à sa meilleure performance pour la réduction des MeS.

En matière de réduction des nutriments, les deux filtres se montrent efficaces pour l'ammonium ($N - NH_4^+$), avec des concentrations de sortie de 8 mg/L pour le Typha et 7 mg/L pour le Vétiver. Cependant, la concentration de nitrates ($N - NO_3^-$) est plus élevée dans le filtre Vétiver (27 mg/L) que dans le filtre Typha (15 mg/L). Cette différence est due à un processus de nitrification plus prononcé dans le filtre Vétiver, favorisé par son système racinaire profond, qui améliore l'oxygénation et intensifie les processus biologiques responsables de la transformation de l'ammonium en nitrates. Ce phénomène a également été observé dans l'étude de Morari et al. (2015), où *Typha latifolia* a montré une capacité supérieure à accumuler des métaux lourds et des éléments nutritifs dans ses tissus, tout en favorisant la réduction des nutriments dans l'effluent.

Pour ce qui est des coliformes fécaux, le Typha montre une meilleure performance, avec une réduction à 170 UFC/100 mL contre 180 UFC/100 mL pour le Vétiver. Cette efficacité s'explique par la densité et la distribution des racines du Typha, qui créent un environnement plus hostile aux pathogènes grâce à un meilleur piégeage des particules fines et des microorganismes. Ces résultats concordent avec l'étude de Ciria et al. (2005), qui a démontré que le Typha est capable de réduire efficacement les pathogènes dans les systèmes de zones humides, renforçant ainsi sa capacité à purifier l'eau de manière plus complète.

Cependant, les variations des performances des filtres, telles que celles observées pour la DCO avec le Vétiver (entre 149 mg/L et 35 mg/L), posent des questions quant à la stabilité du système à grande échelle. Ces fluctuations résultent probablement des différences dans les conditions hydrodynamiques à travers le filtre et des variations dans l'entrée des effluents.

En résumé, les deux filtres présentent des avantages spécifiques. D'une part, le Vétiver excelle dans la réduction de la DCO, d'autre part, le Typha se distingue par sa capacité à éliminer les MeS et les coliformes fécaux. Ainsi, des études complémentaires sur les mécanismes biologiques sous-jacents à ces performances sont nécessaires pour optimiser ces systèmes de filtration. Par ailleurs, l'intégration de systèmes hybrides combinant les atouts des deux plantes est une voie prometteuse pour maximiser l'efficacité du traitement des eaux usées.

En outre, les performances supérieures du Vétiver pour la réduction de la DCO et de la DBO₅ s'expliquent principalement par son système racinaire profond, qui favorise une meilleure aération du sol et une activité microbienne accrue, accélérant ainsi la dégradation des matières organiques complexes. Ces conclusions sont corroborées par l'étude de Mahmoudpour et al. (2021), qui a montré que l'utilisation du Vétiver dans des systèmes de phytoremédiation a permis de réduire de 97 % la DCO et de 90 % la DBO₅ dans des eaux usées à haute teneur en éléments nutritifs.

En revanche, le Typha montre une meilleure capacité à retenir les matières en suspension et à réduire les coliformes fécaux, ce qui correspond aux observations de Ciria et al. (2005), où le *Typha latifolia* a démontré une efficacité supérieure dans le piégeage des particules solides et des pathogènes. En effet, sa morphologie racinaire plus étendue et horizontale permet de filtrer mécaniquement une plus grande quantité de particules en suspension.

En comparant ces résultats avec ceux d'autres études, il est important de souligner que la composition du substrat et les conditions locales, telles que la température et l'humidité, peuvent influencer les performances des filtres. Par exemple, dans l'étude de Morari et al. (2015), les variations de la qualité de l'eau en fonction de l'évapotranspiration ont montré que le *Typha latifolia* et *Phragmites australis* réagissent différemment dans des environnements où la concentration en nutriments et en métaux lourds est élevée. Cela montre que les résultats observés dans cette étude sont cohérents avec la littérature existante, tout en soulignant l'importance de l'adaptation locale des systèmes de traitement.

Ainsi, les performances obtenues dans cette étude peuvent être jugées satisfaisantes non seulement par leur conformité aux normes de rejet, mais aussi par leur comparabilité avec d'autres études similaires. En définitive, les filtres plantés, tels que ceux utilisant le Vétiver et le Typha, s'inscrivent dans une approche durable et adaptable aux conditions locales, mais nécessitent une compréhension approfondie des mécanismes à l'œuvre pour maximiser leur efficacité.

En conclusion, chaque plante présente des avantages spécifiques qui peuvent être exploités en fonction des besoins de traitement. D'une part, le Vétiver est idéal pour des situations nécessitant une réduction plus poussée des charges organiques. D'autre part, le Typha est plus adapté pour des environnements où la filtration mécanique des solides et la réduction des pathogènes sont prioritaires. Ainsi, en envisageant une combinaison des deux filtres, il serait possible d'obtenir un système plus robuste et plus équilibré. Enfin, les études futures devront se concentrer

sur cette synergie potentielle, ainsi que sur l'optimisation des conditions d'exploitation, pour répondre aux défis de l'assainissement durable dans divers contextes.

3.3.2. ANALYSE COMPARATIVE PAR RAPPORT AUX VALEURS CIBLES

L'examen des Tableau 6 et Tableau 7, associé aux valeurs cibles établies dans les travaux de (Bourrier et al. 2010), permet de mettre en lumière les performances des filtres Typha et Vétiver dans le traitement des eaux usées. Pour la Demande Biochimique en Oxygène (DBO5), les deux filtres réussissent à atteindre des valeurs moyennes de sortie de 8 mg/L et 11 mg/L, respectivement, bien en dessous de la valeur cible de 25 mg/L. En ce qui concerne la Demande Chimique en Oxygène (DCO), le filtre Vétiver est plus efficace, atteignant une concentration moyenne de sortie de 74 mg/L, ce qui est en dessous de la valeur cible de 125 mg/L, tandis que le Typha reste au-dessus avec 155 mg/L. Pour les Matières en Suspension (MeS), les deux systèmes surpassent la valeur cible de 35 mg/L, avec des valeurs moyennes de 1 mg/L et 3 mg/L pour le Typha et le Vétiver, respectivement. S'agissant des nitrates, les deux filtres réussissent également à rester bien en dessous de la valeur cible de 50 mg/L, avec des concentrations de 15 mg/L pour le Typha et 27 mg/L pour le Vétiver. En ce qui concerne les phosphates, aucun des filtres n'atteint la valeur cible de 2 mg/L, le Vétiver s'en rapprochant davantage avec 4,5 mg/L contre 8,6 mg/L pour le Typha. En matière de coliformes fécaux, les deux systèmes sont très performants, dépassant largement la valeur cible de 1000 UFC/100 mL avec des concentrations de 170 et 180 UFC/100 mL pour le Typha et le Vétiver, respectivement. En conclusion, les deux filtres sont en général très efficaces, bien que le Vétiver ait un léger avantage pour la DCO. Cependant, une optimisation est nécessaire pour les phosphates. Les données collectées offrent des pistes importantes pour le développement et l'optimisation de futurs systèmes de traitement des eaux usées, particulièrement en milieu rural. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** résume les performances des différents filtre par rapport aux valeurs cibles établies dans les travaux de (Bourrier et al. 2010). Selon ces mêmes hauteurs, même si aucun des filtres n'atteint la valeur cible pour l'élimination des Phosphates, leurs taux d'élimination globale de 81,70% et 90,43%, respectivement pour le Typha et le Vétiver, sont tout de même satisfaisants.

CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons analysé l'amélioration du traitement écologique des effluents prétraités issus d'une fosse septique à l'école de Ndiegene Gondiol 1, équipée d'un système de réacteur biologique à flux horizontal, constitué de deux cellules filtrantes. En comparant deux cellules de lit filtrant, l'une plantée de Vétiver et l'autre de Typha, nous avons obtenu une évaluation comparative de leurs performances respectives. La méthodologie utilisée, combinant enquêtes de terrain et analyses en laboratoire, a été essentielle pour évaluer la charge polluante avant et après traitement.

Les résultats ont confirmé l'efficacité du Vétiver dans la réduction de la DCO, un paramètre clé pour la dégradation des contaminants organiques. En parallèle, le Typha a démontré une meilleure capacité à filtrer les matières en suspension. Bien que les deux filtres aient montré une efficacité notable pour plusieurs paramètres, l'optimisation du traitement des phosphates demeure une priorité. Ces résultats montrent l'intérêt d'une telle solution écologique dans des contextes à ressources limitées. Le système testé ne se limite pas à traiter les eaux usées brutes, mais vise à améliorer la qualité des effluents prétraités dans des fosses septiques, offrant ainsi une option respectueuse de l'environnement et économiquement viable.

L'efficacité des deux plantes, malgré des variations de performances, démontre l'importance de poursuivre les comparaisons pour renforcer les systèmes de traitement. Il est essentiel de reconnaître que l'optimisation continue et des études complémentaires sont nécessaires pour maximiser l'efficacité des systèmes basés sur le Vétiver et le Typha. Les recommandations issues de cette étude visent à orienter les futures initiatives pour promouvoir des solutions d'assainissement écologique adaptées, notamment pour des établissements disposant de fosses septiques.

En conclusion, notre recherche contribue de manière significative à l'avancement des connaissances dans le domaine du traitement écologique des eaux usées, en mettant l'accent sur la durabilité, l'amélioration des systèmes existants et l'adaptabilité des solutions proposées.

REFERENCES

- Abaga, N. O. Z., Dousset, S., & Munier-Lamy, C. (2021). Phytoremediation potential of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in two mixed heavy metal contaminated soils from the Zoundweogo and Boulkiemde regions of Burkina Faso (West Africa). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 9(11), 73–88. <https://doi.org/10.4236/gep.2021.911006>
- Anon. (n.d.). IBM SPSS Statistics. Retrieved December 12, 2023, from <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>
- Arias, C. A., Del Bubba, M., & Brix, H. (2001). Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. *Water Research*, 35(5), 1159–1168. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00368-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00368-7)
- Badejo, A. A., Omole, D. O., & Ndambuki, J. M. (2018). Municipal wastewater management using *Vetiveria zizanioides* planted in vertical flow constructed wetland. *Applied Water Science*, 8, 1–6.
- Bourrier, R., Satin, M., & Selmi, B. (2010). Guide technique de l'assainissement. Éd. le Moniteur.
- Bridgewater, L. L., Baird, R. B., Eaton, A. D., Rice, E. W., American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation (Eds.). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.).

- Washington, DC: American Public Health Association.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology*, 35(5), 11–17.
- Ciria, M. P., Solano, M. L., & Soriano, P. (2005). Role of macrophyte *Typha latifolia* in a constructed wetland for wastewater treatment and assessment of its potential as a biomass fuel. *Biosystems Engineering*, 92(4), 535–544.
- Desa U. N. (2016). Transforming our world : The 2030 agenda for sustainable development. United Nations : New York, NY, USA.
- Drizo, A., Forget, C., Chapuis, R. P., & Comeau, Y. (2006). Phosphorus removal by electric arc furnace steel slag and serpentinite. *Water Research*, 40(8), 1547–1554.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.02.001>
- Golabi, M. H., Duguies, M., Chomchalow, N., & Sombatpanit, S. (n.d.). Application of the Vetiver system for wastewater treatment: An innovative nutrient removal technology for sewage water treatment in Southern Guam.
- Hanna Instruments. (2023). HI98304 Conductivity Tester. Available at :
https://www.hannainst.es/parametros/4244-tester-ce.html#/466-rango-0_00_a_19_99_ms_cm
- Johansson, L., & Gustafsson, J. P. (2000). Phosphate removal using blast furnace slags and opoka-mechanisms. *Water Research*, 34(1), 259–265.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00135-9)
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). Treatment wetlands. CRC Press.
- LATEU. (n.d.). Laboratoire de Traitement Des Eaux Usées (LATEU - UCAD). Retrieved August 17, 2023, from <https://lateu.ucad.sn/>
- Mahmoudpour, M., Gholami, S., Ehteshami, M., & Salari, M. (2021). Evaluation of phytoremediation potential of vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) for wastewater treatment. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021(1), 3059983.
- Morari, F., Dal Ferro, N., & Cocco, E. (2015). Municipal wastewater treatment with *Phragmites australis* L. and *Typha latifolia* L. for irrigation reuse: Boron and heavy metals. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226, 1–14.
- NF ISO 4832 (Juillet 2006). Microbiologie des aliments – Méthode horizontale pour le dénombrement des coliformes - Méthode par comptage des colonies (IC).
- NF V 08-050 (Février 1999). Microbiologie des aliments - Dénombrement des coliformes par comptage des colonies obtenues à 30 °C - Méthode de routine (IC : V 08-050).
- NF V 08-060 (Mars 1996). Microbiologie des aliments - Dénombrement des coliformes thermotolérants par comptage des colonies obtenues à 44 °C - Méthode de routine (IC : V 08-060).
- Prüss-Ustün, A., Wolf, J., Corvalán, C., Neville, T., Bos, R., & Neira, M. (2017). Diseases due to unhealthy environments : An updated estimate of the global burden of disease attributable to environmental determinants of health. *Journal of Public Health*, 39(3), 464–475.
- Reddy, K. R., & DeLaune, R. D. (2008). Biogeochemistry of wetlands: Science and applications. CRC press.
- Robertson, W. D., & Cherry, J. A. (1995). In situ denitrification of septic-system nitrate using reactive porous media barriers: Field trials. *Groundwater*, 33(1), 99–111.
- Roongtanakiat, N. (2009). Vetiver phytoremediation for heavy metal decontamination. PRVN Tech. Bull 1.
- TIEDJE, J. M. (1988). Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium. *Biology of Anaerobic Microorganisms*, 179–244.
- Torrens, A., de la Varga, D., Ndiaye, A. K., Folch, M., & Coly, A. (2020). Innovative multistage constructed wetland for municipal wastewater treatment and reuse for agriculture in Senegal. *Water*, 12(11), 3139.
<https://doi.org/10.3390/w12113139>
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1–3), 48–65.
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 61–69.
<https://doi.org/10.1021/es101403q>
- World Health Organization (WHO). (2017). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta, and greywater. Volume 2 : Wastewater use in agriculture.