

Amélioration De La Qualité Des Eaux (Eaux Usées, Nappe Phréatique Et Lac) Par Phytoépuration Dans La Zone Du Technopole De Dakar (Sénégal)

Mouhamadou Thierno Gueye¹, Dame Bop², Aissatou Ndoye³, Sabrina Sorlini⁴

¹Université Cheikh Anta Diop de Dakar
Faculté des Sciences et Techniques, Département de Chimie
Sénégal

²Université Cheikh Anta Diop de Dakar
Faculté des Sciences et Techniques, Département de Chimie
Sénégal

³Office Nationale de l'Assainissement du Sénégal
Laboratoire de décharge et de contrôle
Sénégal

⁴Université degli studi di Brescia
Laboratoire de recherche sur les technologies appropriées pour la gestion
de l'environnement dans les pays à ressources limitées
Italie



Résumé— L'assainissement municipal et la gestion des eaux usées sont des problèmes difficiles pour le développement environnemental durable dans les pays en développement. L'augmentation des rejets d'eaux usées non ou mal traitées par la station d'épuration (STEP) du Technopole de Dakar (Sénégal), combinée au ruissellement agricole ont entraîné la dégradation de la qualité des eaux de la nappe phréatique et du lac dans cette zone. Ainsi, la construction d'une installation pilote pour le traitement de ces eaux usées très chargées en polluants et produites par la station d'épuration des eaux usées du Technopole a été réalisée. La configuration du filtre horizontal est composée d'une fosse septique, d'une zone humide à flux horizontal submergé et d'un réservoir de stockage. Au terme de ce travail, nous avons un pourcentage global d'épuration de 69% des eaux usées mal traitées par la STEP à raison de 2 m³ par jour. En effet, la phytoépuration à travers le filtre horizontal a entraîné une réduction de 90,5% des MEST ; 63,4% de la DBO₅ ; 74,7% de la DCO ; 17,2% de l'azote total et 98,2% d'Escherichia Coli. Cependant, il restait toujours une quantité élevée d'Escherichia Coli et d'azote, par conséquent, un traitement tertiaire est recommandé, par exemple, la désinfection est suggérée par UV ou hypochlorite ou chlore pour une élimination des agents pathogènes mais aussi la nitrification et la dénitrification.

Mots Clés— Assainissement, Eaux Usées, Zone Humide, Phytoépuration, Technopole

Abstract— Municipal sanitation and wastewater management are challenging issues for sustainable environmental development in developing countries. The increase in discharges of untreated or poorly treated wastewater by the Dakar (Senegal) Technopole wastewater treatment plant (WWTP), combined with agricultural runoff, have led to the deterioration of the quality of groundwater and lake water in this area. Thus, the construction of a pilot installation for the treatment of this waste water very charged in pollutants and produced by the wastewater treatment plant of the Technopole was carried out. The configuration of the horizontal filter is composed of a septic tank, a submerged horizontal flow wetland and a storage tank. At the end of this work, we have an overall percentage of purification of 69% of wastewater badly treated by the WWTP at the rate of 2 m³ per day. Indeed, the phytopurification through the horizontal filter led to a 90.5% reduction in MEST; 63.4% of BOD₅; 74.7% of COD; 17.2% of total nitrogen and 98.2% of

Escherichia Coli. However, there was still a high amount of Escherichia Coli and nitrogen remaining, therefore tertiary treatment is recommended, for example, disinfection is suggested by UV or hypochlorite or chlorine for pathogen removal but also nitrification and denitrification.

Keywords—Sanitation, Wastewater, Wetland, Phytoremediation, Technopole

I. INTRODUCTION

L'assainissement municipal et la gestion des eaux usées sont des problèmes difficiles pour le développement environnemental durable dans les pays en développement. La croissance démographique dans les zones urbaines a entraîné une augmentation de la demande et de l'approvisionnement en eau potable. Cette augmentation influe sur la production d'eaux usées municipales. En particulier, l'Afrique subsaharienne, fait face à un problème de gestion des eaux usées municipales en raison du manque de systèmes d'assainissement et de traitement des eaux usées appropriés, y compris un système de réseau d'égouts. La plupart des eaux usées des zones domestiques, commerciales et industrielles sont directement rejetées dans les eaux réceptrices, telles que les canaux de drainage, les ruisseaux, les marais, les lacs. Les eaux usées domestiques sont traitées en utilisant uniquement des installations d'élimination des eaux usées et de traitement de base sur site, telles que les latrines, les fosses septiques. C'est ainsi que la gestion des boues de vidange et des eaux usées pose beaucoup de problèmes. Au cours des 30 prochaines années, la plus grande partie de la croissance démographique mondiale se produira dans les zones urbaines des pays en développement (Montgomery, 2004). L'augmentation rapide de la population et les styles de développement urbain non planifiés, sans contrôle ni réglementation, font des grandes villes les foyers de risques émergents pour l'environnement et la santé (Health Effects Institute, 2004). Il existe plusieurs stratégies de traitement des eaux usées, ne tenant compte que de celles qui, grâce à leur rentabilité et à leur applicabilité facile, peuvent être utilisées dans les pays en développement. Le choix d'un traitement spécifique est strictement lié à l'utilisation finale des effluents épurés pouvant être réutilisés en agriculture, rejetés au sol ou dans des masses d'eau de surface. En général, l'eau traitée doit atteindre les objectifs fondamentaux suivants (Morel et Diener, 2006) : (1) protéger la santé publique; (2) protéger l'environnement; (3) assurer la fertilité du sol (en particulier pour la réutilisation agricole); (4) garantir l'acceptabilité culturelle, sociale et économique; (5) adopter des systèmes simples et conviviaux; (6) répondre aux normes et directives nationales et internationales.

Le Sénégal est un pays d'Afrique subsaharienne confronté à de grandes difficultés pour gérer son environnement, en particulier les eaux usées. En 2015, le Sénégal n'a pas atteint l'objectif de 77% fixé par les objectifs du millénaire pour le développement (OMD) d'améliorer la couverture en assainissement, qui était de 37% au niveau national (ANSD, 2014). La capitale sénégalaise rejette plus de 200 000 m³ d'eaux usées par jour en 2006 (Akpo, 2006). La forte concentration de la population dans la capitale sénégalaise à Dakar qui représente le quart de la population nationale (ANDS, 2008) engendre des rejets importants d'eaux usées, d'excréta (N'diaye, 2007), de déchets solides (Diawara, 2009) dans des zones sensibles à la pollution. La majorité des eaux usées rejetées ne subissent pas de traitement et sont déversées dans la mer, dans les rues ou même parfois dans des zones qui devraient être spécialement protégées telles que les zones humides. Ainsi pour lutter contre la pollution, une station d'épuration (STEP) des eaux usées a été installée dans la zone du Technopole de Dakar en juin 2008 pour recevoir et traiter les eaux usées des quartiers voisins. La zone du Technopole est une zone très propice à l'agriculture (Badiane et al., 2017), par conséquent les eaux traitées par la station d'épuration sont réutilisées par les agriculteurs pour cultiver toutes sortes de produits agricoles. Cependant, l'augmentation des rejets d'eaux usées non ou mal traitées, combinée au ruissellement agricole ont entraîné la dégradation de la qualité des eaux souterraines et de surface dans la zone du Technopole. Or, les conséquences de l'émission d'eaux usées non ou mal traitées peuvent être classées en trois catégories : (1) effets nocifs pour la santé humaine; (2) impact négatif sur l'environnement et (3) répercussions néfastes sur les activités économiques (WWAP, 2017). En outre, l'utilisation de ces eaux usées mal traitées a pour conséquence un risque très élevé d'insécurité alimentaire (Gueye et al., 2022).

Cependant, plusieurs expérimentations ont été analysées afin de choisir la meilleure configuration dans les pays en développement caractérisés par un climat chaud et de mieux comprendre les technologies plus appropriées, les rendements possibles ainsi que les avantages / inconvénients des technologies. Les configurations du système sont multiples et le choix de l'une d'elles dépend de plusieurs facteurs, tels que les rendements, la morphologie de la zone, la nature des eaux usées, la disponibilité du matériel, la finalité etc. Le choix de la technologie du système doit être développé de manière à satisfaire au mieux les besoins de la population, traitant également de la disponibilité des ressources et des facteurs locaux qui caractérisent la

zone sous enquête. Après avoir identifié les problèmes de la STEP, et sachant aussi que le Sénégal est un pays en voie de développement dont les ressources sont limitées, la technologie de phytoépuration a été choisie pour améliorer les eaux usées traitées qui polluent les eaux souterraines et de surface par la méthode des zones humides construite. Les plantes généralement utilisées dans les systèmes de traitement naturels, tels que les zones humides construites, sont typiques des environnements humides. Ils sont divisés en deux groupes principaux : les macrophytes et les hydrophytes; les premiers sont des plantes à racines émergentes, dont les racines pénètrent dans les sols (partiellement ou totalement saturés d'eau), tandis que les feuilles et les fleurs émergent de l'eau; le corps végétatif des hydrophytes, en revanche, est complètement submergé ou flotte à la surface de l'eau. Dans le cas des installations de traitement à flux horizontal submergées, les plantes les plus couramment utilisées sont les macrophytes et les critères de sélection des espèces concernent différents aspects. Les plantes utilisées dans les zones humides construites HF (Horizontal Flow) conçues pour le traitement des eaux usées doivent donc: (1) être tolérantes aux charges organiques et nutritives élevées, (2) posséder de riches organes souterrains (racines et rhizomes) afin de fournir un substrat aux bactéries attachées et à l'oxygénation (même très limitée) des zones adjacentes aux racines et aux rhizomes et (3) ont une biomasse aérienne élevée pour l'isolation hivernale dans les régions froides et tempérées et pour la suppression des éléments nutritifs par la récolte (Vymazal, 2011). *Phragmites australis* appelé roseau qui est une espèce originaire d'Eurasie, mais répandue dans le monde entier, a été choisi pour le traitement. C'est la plus largement utilisé dans les zones humides construites à flux submergés, en raison de ses rendements d'épuration, de son rôle d'oxygénation et de sa résistance aux conditions climatiques les plus diverses. Il peut atteindre une hauteur de 2,5 m. C'est une plante vivace et tolérante aux inondations, dotée d'un vaste système de rhizomes qui pénètre habituellement à une profondeur d'environ 0,6 à 1,0 m. En été, il a un panache brun sur le dessus. Le roseau (*Phragmites australis*) est utilisé pour le traitement des eaux usées municipales et domestiques, mais il a également été utilisé avec succès pour les zones humides construites traitant différents types d'eaux usées.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. La zone d'étude

L'étude porte sur le Technopole, une zone localisée dans la grande Niaye du département de Pikine à Dakar (Fig.1). Niaye est un terme local utilisé pour désigner les dépressions inter-dunes où des pratiques agricoles sont développées (Faye et al., 2004). C'est une zone humide qui abrite une diversité de ressources naturelles. Elle présente des valeurs sociales, économiques, culturelles, esthétiques, récréatives et éducatives (Badiane et al., 2017). Sa végétation est dominée par les plantes aquatiques avec une importante prolifération de Typha et de roseaux. La zone des Niayes au Sénégal est située le long du littoral Nord, de Dakar à Saint-Louis sur une bande côtière de 10 à 15 km de large et 180 km de long, c'est une dépression géologique avec un niveau élevé de la nappe phréatique qui traverse la région de Dakar (Sy et al., 2014). C'est une zone fertile d'une importance agricole et maraîchère, qui fournit 80 % de la production totale des légumes aux marchés de Dakar et de l'intérieur du Sénégal (Gaye et Niang, 2010). Les Niayes sont nombreuses dans la région de Dakar, celle de Pikine, le Technopole, est la plus importante et se situe en plein cœur de l'agglomération urbaine. Les sols des Niayes de Pikine sont par excellence, des sols de cultures maraîchères car ce sont des sols à hydromorphie partielle (Ndao, 2012). La nappe superficielle, le rejet des eaux usées traitées par la station d'épuration, les canaux d'évacuation des eaux pluviales et stagnantes des quartiers voisins, les eaux pluviales pendant l'hivernage ont renforcé les eaux de la zone inondable qui est devenu un lac.

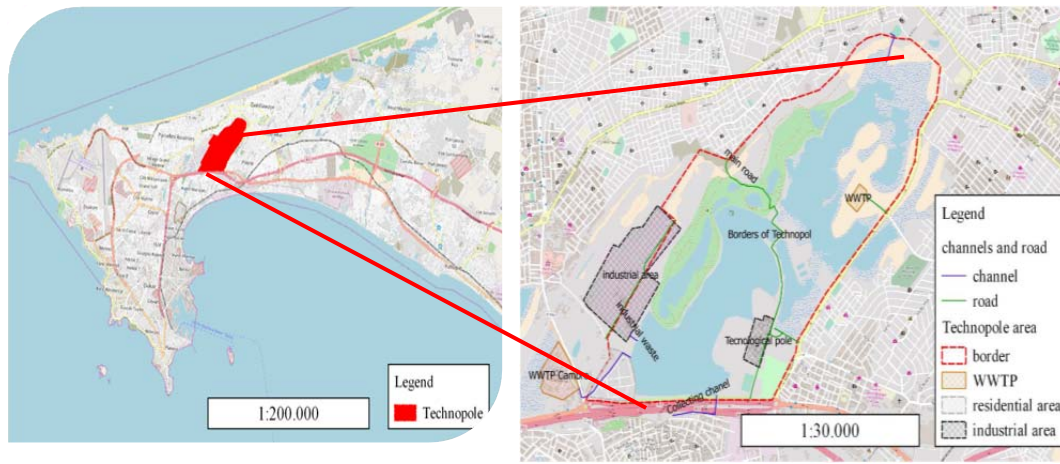


Fig.1: Localisation de la zone d'étude du Technopole à Dakar

Le Technopôle est notre zone de recherche. C'est une zone humide dont l'écosystème est très favorable à la vie animale et le développement des activités agricoles, il abrite la station d'épuration (STEP) des eaux usées. La STEP traite les eaux usées venant des fosses septiques des quartiers ne possédant pas d'assainissement collectif, et les eaux usées de différentes natures de la station de pompage de Guédiawaye, une ville située dans la zone nord du Technopole. Les départements de Pikine et de Guédiawaye (région de Dakar, Sénégal) comptent 1 592 994 habitants (RGPHAE, 2015). Cela se traduit par une production considérable de boues $1\,130\text{ m}^3/\text{jour}$ (ONAS, 2014). Ainsi, la station reçoit les eaux usées venant du prétraitement des boues de vidange de la partie privée Delvic Sanitation Initiatives et des eaux usées de la station de pompage de Las Palmas de Guédiawaye (Fig.2). Environ 500 m^3 d'eaux usées est fourni chaque jour par la partie Delvic à la STEP et 2500 m^3 par la station de pompage de Las Palmas de Guédiawaye. Cependant, la STEP des Niayes reçoit quotidiennement environ 3000 m^3 d'eaux usées alors que sa capacité de traitement est de 825 m^3 par jour (Bop et Gueye, 2020).

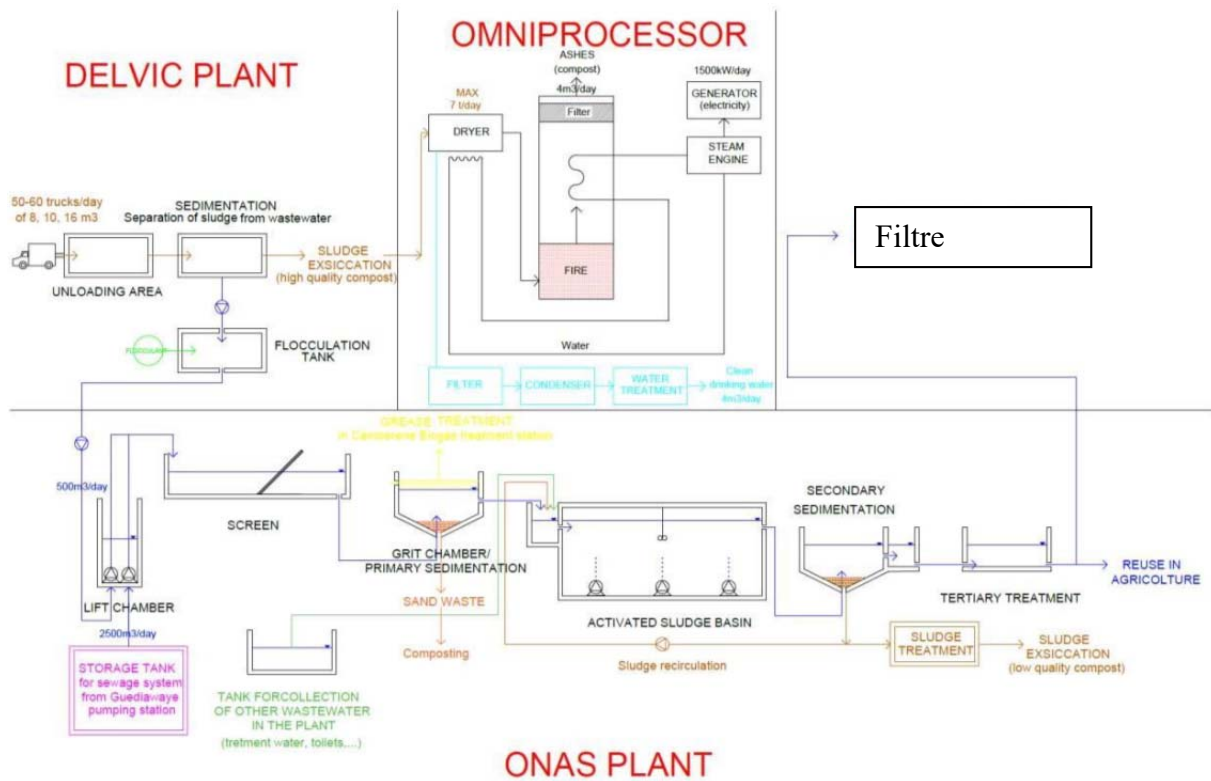


Fig.2: Schéma de toutes les composantes de la station de traitement

L'installation de la STEP de traitement des eaux usées est composée des parties suivantes (Fig.3):

- une chambre qui sert de décanteur primaire séparant la partie liquide en haut et le sable (en bas), la graisse plus légère se met aussi en haut ;
- un bassin à boues activées, qui est un digesteur aérobie ;
- un bassin de décantation secondaire, qui sépare l'eau clarifiée des boues ; une partie des boues sera recyclée tandis qu'une autre partie sera traitée, analysée et réutilisée sous forme de compost par les maraîchers ;
- un traitement tertiaire constitué d'un filtre à sable et d'un réservoir de désinfection ; le filtre à sable ne fonctionne plus car, en raison de la surcharge de l'installation, il était continuellement encrassé par la concentration élevée de solides entrant.



Fig.3: Bassin à boues activées, un bassin de décantation secondaire, traitement tertiaire (de gauche à droite)

2.2. Conception de l'installation du filtre horizontal

L'idée était de construire une usine de traitement tertiaire pour améliorer la qualité des eaux usées traitées par la STEP ; la technologie devait être naturelle, économiquement abordable et facile à gérer, afin de pouvoir être ajoutée en aval à la station d'épuration existante des Niayes. Pour le moment, l'objectif n'est pas de collecter toutes les eaux qui sortent, mais de construire

une usine pilote et de la surveiller dans des conditions contrôlées, afin de valider la technologie en vue d'une future expansion. La zone du projet est située à l'intérieur de la STEP des Niayes dans la zone de Technopole. Le problème principal réside dans le fait que la STEP est sous-dimensionnée par rapport aux quantités croissantes de boues non traitées et d'eaux usées, de sorte que l'eau qui sort de la STEP ne convient ni à l'irrigation, ni au rejet (Gueye et al., 2022), conformément aux normes sénégalaises et aux directives de l'OMS et de la FAO, ce qui nuit à la qualité de l'environnement de la zone (Fig.4).



Fig.4: Etat des eaux usées traitées par la STEP

Les eaux usées entrantes dans notre système sont les eaux usées males traitées par la STEP. Ainsi, en essayant de prendre en considération tous les facteurs, la configuration du système identifiée comprend (Fig.5):

- une fosse septique (avec une vanne de fermeture) qui est à la fois un réservoir de chargement, un décanteur principal, un alimentateur du filtre ;
- un filtre horizontal à sable planté de roseaux qui représente la zone humide construite submergée ;
- un réservoir de stockage des eaux filtrées.

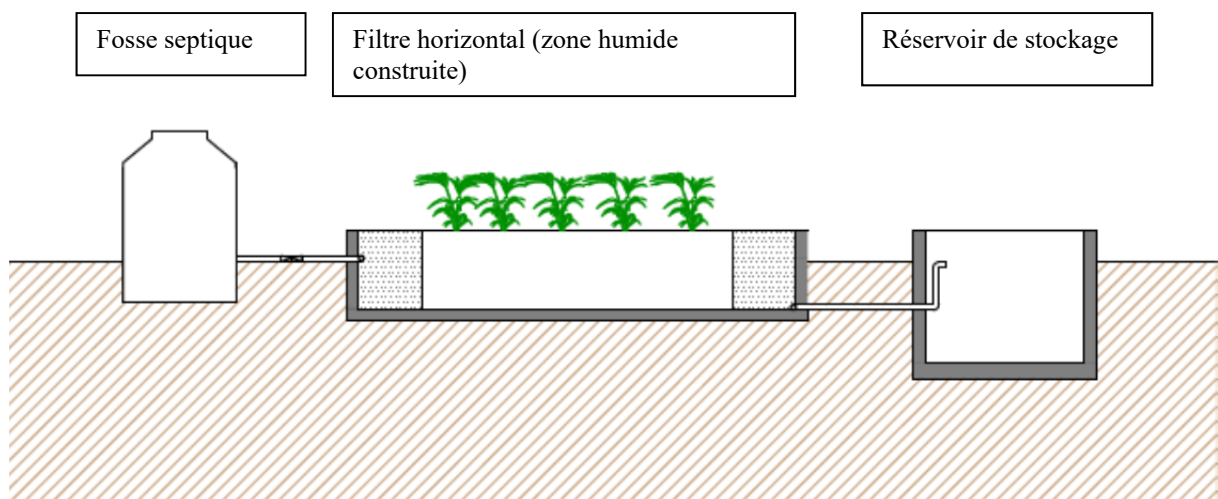


Fig.6: Schéma simplifié de la configuration du système

Nous avons décidé de prendre la pompe de l'ONAS qui alimentait les maraichers en eaux usées traitées par la STEP ; l'extrémité de ce tuyau est placée à l'intérieur de la fosse septique afin de la remplir complètement ; le tuyau de sortie de la fosse septique est placé à une hauteur assurant la vidange de la fosse pour un volume d'eau égal à 2 m^3 ; cette conduite est équipée d'une vanne permettant de contrôler le débit. Ainsi, le volume total de la fosse septique était égal à 3 m^3 . Le tuyau d'alimentation de la zone humide construite est situé à $0,6 \text{ m}$ du fond de la fosse septique : il crée un volume de 1 m^3 au fond du réservoir réservé à la

digestion et au stockage des boues digérées, afin de ne pas le laisser traverser la conduite, et le volume restant (2 m^3) peut être utilisé pour le traitement. Le débit avec lequel nous avons décidé de travailler est de $2 \text{ m}^3/\text{j}$. Cependant, ce calendrier suivant était suivi tout en tenant compte du fait que plusieurs échantillons étaient généralement prélevés et la moyenne est calculée.

- Premier jour : remplissage de la fosse septique ; phase de sédimentation à l'intérieur de la fosse septique nécessitant plus ou moins une demi-journée.
- Deuxième jour : ouverture de la vanne afin de vider la fosse septique ;
- Troisième jour : prélèvement d'un échantillon du point de surveillance dans le réservoir de stockage.

Après deux semaines de fonctionnement, nous avons constaté une stabilisation des paramètres : à partir de cette période, l'usine avait été considérée comme fonctionnant à pleine capacité. Les paramètres des eaux usées à améliorer sont variables car les eaux usées à la sortie de la station d'épuration ne sont constantes ni en volume ni en niveau de pollution. Par ailleurs, la plante utilisée était *Phragmites Australis* (roseau des marais) largement disponible dans la zone du Technopole (Fig.7). En effet, nous avons pris le soin de ne prendre que des plantes jeunes de tailles petites ou moyenne et avec des racines avec de nouveaux rhizomes, afin de les greffer facilement.



Fig.7: *Phragmites australis* (roseau des marais)

Après prélèvement, le pH et la température ont été mesurés par l'appareil pH 340i / SET. La conductivité et le taux de solide dissous TDS ont été mesurés par l'appareil COND 70. D'après nos résultats on a la relation suivante : $CE=1.4 \times TDS$. L'oxygène dissous a été mesuré par oxi 3310 IDS Set 1. Les analyses des paramètres (DCO, DBO, nitrates, nitrites) ont été effectuées par l'appareil HACH DR/4000v du Spectrophotomètre du laboratoire de l'Office National de l'Assainissement du Sénégal (ONAS). Les mesures de l'azote Kjeldahl et le phosphore total ont aussi été faites au laboratoire de l'ONAS.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Résultats

Les résultats des mesures sont obtenus par la moyenne de plusieurs mesures pour chacun des paramètres correspondant. Ainsi, le Tab.1 indique les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques et microbiologiques des eaux usées provenant de Delvic (EU Delvic), mélange des eaux de Delvic et de Las Palmas (EU entrant) et des eaux traitées par la STEP (EU sortant) respectivement.

Tableau I: Valeurs Moyennes Des Parametres Des Eaux Usees Avant Et Apres Traitement

Paramètres	pH	Conduc (mS/cm)	Salinité (g/L)	MEST (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DCO (mg/L)	TKN (mg/L)	PTOT (mg/L)	Col. Fécaux (UFC/100mL)
EU Delvic	7.50	3.88	2.2	1568	657	2660	512.55	18.85	790000
EU entrant	7.58	3.05	1.5	2543	800	3265	456.35	19.75	4600000
EU sortant	7.86	2.74	1.3	328	238	703	271	5.8	1810000
Limites SN	5.5-9.5	<3	-	<50	<80	<200	<30	<10	<1000

En ce qui concerne les valeurs de sortie de la STEP (celles qui caractérisent les eaux réutilisées en agriculture et rejetées dans le lac du Technopole), il est facile de remarquer que les concentrations en MEST, DBO₅, DCO, NTK et coliformes fécaux dépassent largement les limites des normes de rejet des eaux usées sénégalaises. En effet, la station d'épuration (STEP) a un bon rendement d'élimination soit 68% en moyenne donc fonctionne bien (Tab.2), mais elle est néanmoins manifestement surchargée et ne peut donc pas garantir de bonnes valeurs de sortie des eaux clarifiées pour respecter les normes de rejet et de réutilisation des eaux usées.

Tableau II: Efficacite D'elimination Des Moyennes Des Parametre De La Step

Paramètres	MEST (%)	DBO ₅ (%)	DCO (%)	NTK (%)	PTOT (%)	Col. Fécal (%)	Total (%)
Efficacité d'élimination	87	70	78	41	71	61	68

Cependant, l'augmentation des rejets d'eaux usées non ou mal traitées, combinée au ruissellement agricole ont entraîné la dégradation de la qualité des eaux souterraines (nappe phréatique) et de surface (lac) dans la zone du Technopole. Ainsi, la moyenne des différents points des analyses des paramètres mesurés in situ (conductivité, pH, température, total des solides dissous TDS, oxygène dissous, salinité) dans les différentes typologies sont dans le Tab.3 et celle des paramètres physicochimiques et biologiques dans le Tab.4. Cependant, l'ensemble des analyses physicochimiques et microbiologiques ont révélé une pollution de la nappe phréatique et du lac. Ceci est probablement dû aux valeurs des concentrations en MEST, DBO₅, DCO et E. coli des eaux usées traitées sortant de la STEP qui ne respectent pas les normes de rejet des eaux usées sénégalaises.

Tableau III: Moyennes Des Mesures In Situ Dans Les Differentes Typologies

Typologies	pH	Conduc (mS/cm)	TDS (g/L)	O.D (mg/L)	t°(C)	Salinité (mg/L)	Utilisation
Eaux usées traitées	7.6	3.8	2.8	0.6	31.3	1.2	Agriculture
Nappe phréatique	7.1	4.4	3.2	2.7	30	1.4	Agriculture
Lac	8.4	37.2	27	5.7	31	21	Pêche
Limites SN	5.5-9.5	<3	-	-	< 30	-	

Tableau IV: Moyennes Des Mesures Des Parametres Physicochimiques Et Biologiques Dans Les Differentes Typologies

Typologie	MEST (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DCO (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	TKN (mg/L)	PTOT (mg/L)	E. Coli (U/100ml)
Eaux usées traitées	1219.5	281.2	1673	9	0.03	224.21	37.89	1006650
Nappe phréatique	40	20.2	81.4	46.4	1.2	21.6	12.75	6 175
Lac	85.9	48.7	826.7	11	0.1	67.58	3.93	2250
Limites SN	<50	<80	<200	-	-	<30	<10	<1000

En effet, pour améliorer la qualité de ces eaux usées traitées qui contaminent la nappe et le lac, nous avons utilisé un filtre horizontal à sable planté de roseaux qui représente la zone humide construite submergée. Ainsi, l'amélioration de l'eau est visible dans le Tab.5. En outre, le Tab.6 présente les moyennes des paramètres de qualité des eaux traitées brutes et à la sortie du filtre horizontal. Aussi, le pourcentage d'épuration est donné dans le Tab.7.

Tableau V: Resultats Des Mesures Des Parametre De Qualite Des Eaux Sortant Le Filtre Horizontal

Paramètres/Dates	31/10	02/11	05/11	07/11	13/11	15/11	22/11	28/11	Moyennes
pH	7.17	7.96	7.74	8.71	8.17	8.23	8.16	-	8.02
Cond (mS/cm)	2.86	2.89	2.94	2.27	2.58	2.48	3.06	2.53	2.70
Oxygène dissous (mg/L)	1.17	1.08	1.81	0.8	1.21	0.188	0.128	-	1
Température (°C)	28.8	29	-	29	26.4	24.8	28.7	-	28
Salinité (g/L)	1.1	1.0	1.0	1.2	1.2	1.1	1.5	1.2	1.2
MEST (mg/L)	36	24	27	29	30	41	35	27	31
BOD ₅ (mg/L)	90	-	100	85	95	55	60	125	87
DCO (mg/L)	188	171	149	165	168	164	-	241	178
E. Coli (UFC/100mL)	14500	59500	6300	14600	10700	14200	5300	8200	17975
TKN (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	224.3
PTOT (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	6.6

Tableau VI: Moyennes Des Parametres De Qualite Des Eaux Traitees Brutes Et Sortant Du Filtre Horizontal

Paramètres	pH	Conduc (mS/cm)	Salinité (g/L)	O D (mg/L)	MEST (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DCO (mg/L)	TKN (mg/L)	PTOT (mg/L)	E.Coli (UFC / 100 mL)
Eaux usées traitées brutes	7.86	2.74	1.3	0.01	328	238	703	271	5.8	1006650
Sortie du filtre horizontal	8.02	2.70	1.2	1	31	87	178	224.3	6.6	17975
Limites SN	5.5-9.5	<3	-	-	<50	<80	<200	<30	<10	< 1000

Tableau VII: Efficacité D'élimination Des Valeurs Moyennes Des Parametres Du Filtre Horizontal

Paramètres	MEST (%)	DBO5(%)	DCO (%)	NTK (%)	E. coli (%)	Total (%)
Efficacité d'élimination	90.5	63.4	74.7	17.2	98.2	69

3.2. Discussion

La temperature

30 °C est la limite suggérée par la FAO pour l'utilisation des eaux dans l'irrigation et représente aussi la limite sénégalaise pour le rejet des eaux usées. Sur la base de cette limite, la moyenne de toutes les températures de sortie (dans le réservoir de stockage) est de 28 °C alors que celle des eaux à la sortie de la STEP était 31,3 °C (Tab.5). En effet, ce paramètre est strictement lié aux conditions météorologiques même si les eaux sortant de la STEP sont souvent un peu chaudes.

Le pH

Toutes les valeurs du pH à la sortie (réservoir de stockage) sont dans l'intervalle recommandé par l'OMS (2006), la limite légale est presque toujours respectée pour une utilisation agricole. Cependant, le pH augmente légèrement de 7,86 à 8,02 et devient en moyenne un peu plus basique (Tab.6). Ceci est probablement dû au fait que lors des premiers prélèvements, le filtre a tendance à libérer des substances susceptibles d'influencer ce paramètre (Bezzi, 2016, USEPA, 1995). Ainsi, il peut être expliqué par la phase de stabilisation pendant laquelle se forme de microalgues à la surface (Lananan, 2014) et, en outre, l'absorption de nutriments et de cations métalliques par les racines des plantes est aussi responsable de changements substantiels du pH de la rhizosphère (Javed, 2011).

Conductivité, salinité

La conductivité électrique diminue légèrement en moyenne de 2,74 mS/cm à 2,70 mS/cm à travers le filtre horizontal (Tab.6). Ainsi, elle est conforme à la limite maximale de 3 mS/cm de la FAO pour l'utilisation des eaux usées dans l'agriculture.

La salinité est strictement liée aux paramètres précédents : une relation entre la salinité et la conductivité peut être représentée comme suit :

$$Salinité = K * Conductivité \quad (1)$$

Par conséquent, nous observons également une légère diminution de 1,3 g/L à 1,2 g/L.

Oxygène dissous

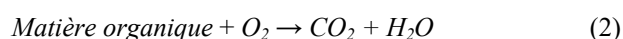
Il n'y a pas de limite ni dans les directives de la FAO ou de l'OMS, ni dans les normes sénégalaises concernant le rejet des eaux usées (NS 05-061 de juillet 2001); juste une valeur de 4 mg/L minimale pour une vie aquatique sans risques pour les animaux. L'oxygène dissous (OD) qui était presque nulle dans le eau sortant de la STEP s'est légèrement amélioré dans la zone humide construite, passant de 0,011 mg/L à 1 mg/L (Tab.6).. Sachant que la concentration en oxygène dissous dans l'eau varie avec la température, les sels dissous et l'activité biologique (Kadlec et Wallace, 2009), l'aération de l'eau à l'intérieur de la zone humide construite et la formation d'une couche d'algues peuvent être les causes de cette augmentation.

Les matières en suspension MEST

Les matières en suspension totales des eaux usées entrant dans notre système passent en moyenne de 328 mg/L à 31 mg/L avec une efficacité d'élimination de 90,5% (Tab.7); cela a permis la clarification de l'eau. La matière organique décantable est rapidement éliminée dans le système de traitement dans des conditions calmes par sédimentation (fosses septiques) puis par filtration (zones humides aménagées). L'élimination des MEST dans les zones humides de traitement est principalement due à des processus physiques, tels que la sédimentation et la filtration, qui ne dépendent pas de la température (Kadlec et Wallace, 2009). Ainsi, l'eau filtrée destinée à l'irrigation est conforme aux normes sénégalaises de rejet des eaux usées NS 05-061 de juillet 2001, dans lesquelles le maximum est de 50 mg/L.

Demande biologique en oxygène (DBO₅)

En ce qui concerne la DBO₅, 80 mg / L est la limite suggérée par les normes sénégalaises pour le rejet des eaux usées à la surface. La demande biologique en oxygène passe d'une valeur moyenne de 238 mg/L à 87 mg/L (>80 mg/L) avec une efficacité d'élimination de 63,4% dans le filtre horizontal (Tab.7). Cette valeur dépasse même la plage d'efficacité d'élimination dans les systèmes de traitement anaérobie des eaux usées domestiques suggérée par Chernicharo (2006) qui est de 35 à 60%. En effet, la dégradation aérobie des matières organiques solubles est régie par la réaction suivante au moyen de bactéries hétérotrophes aérobies (Vymazal, 1998):



Les zones aérobies de la zone humide construite se situent autour des racines et des rhizomes, grâce à Aerenchyma, un tissu spongieux qui forme des canaux d'air dans les racines de certaines plantes aquatiques ; il permet l'échange d'oxygène avec la partie de la plante située au-dessus de l'eau et crée des zones oxydées dans la rhizosphère. Lors du passage des eaux usées à travers la rhizosphère, celles-ci sont nettoyées par dégradation microbiologique et par des processus physico-chimiques. Dans ces zones, la majeure partie du contenu organique des eaux usées est décomposée en dioxyde de carbone et en eau en utilisant de l'oxygène comme accepteur d'électrons terminal (Brix, 1987).

Demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO passe d'une valeur moyenne de 708 mg/L à 178 mg/L avec une efficacité d'élimination de 74,7% après le passage du filtre horizontal (Tab.7). Cette valeur de sortie est conforme à la limite maximale fixée par les normes sénégalaises en matière de rejet des eaux usées (NS 05-061 juillet, 2001), qui est de 200 mg/L dans le cas où le débit quotidien maximal ne dépasse pas 100 kg/jour.

Azote total Kjeldahl et phosphore total

Les législations du Sénégal et de l'OMS pour la réutilisation des eaux usées en agriculture fixent la limite de l'azote total dans les eaux d'irrigation à 30 mg/L. En effet, les résultats des analyses montrent que les eaux traitées par STEP présente un niveau d'azote incroyablement élevé dont notre usine pilote n'a pas été capable d'éliminer efficacement pour pouvoir respecter les normes de rejet des eaux usées sénégalaises. Ainsi, la concentration moyenne en azote total Kjeldahl de l'eau à traiter était environ 271 mg/L. Après traitement du filtre, la concentration en azote total Kjeldahl (NTK) était de 224,3 mg/L, ce qui correspond à une élimination de NTK de 17,2% (Tab.7). Ce rendement d'élimination confirme le faible taux d'élimination de l'azote à l'intérieur d'une zone humide horizontale submergée.

Par ailleurs, la norme sénégalaise impose une limite de 10 mg/L de rejet des eaux usées or nous avons une valeur de 6,6 mg/L après traitement. Théoriquement, le phosphore n'est pas largement réduit par une zone humide horizontale submergée. Ainsi, Dotro et al. (2017), suggère un taux d'élimination de 10 à 20%, mais seulement après une longue période.

Paramètres microbiologiques

Les *Escherichia coli* sont des bactéries qui indiquent une contamination fécale récente (Byamukama, 2005). La teneur en *Escherichia Coli* passe d'une valeur moyenne de 1 006 650 UFC/100 mL à 17 975 UFC/100 mL avec une efficacité d'élimination de 98,2% après traitement (Tab.7). Malgré que l'efficacité d'élimination d'*Escherichia Coli* du système soit élevée, la limite pour le rejet des eaux usées au Sénégal (NS 05-061, juillet 2001) et celle suggérée par les directives de l'OMS pour la réutilisation des eaux usées dans l'irrigation (OMS, 2006), égale à 1 000 UFC/100 mL n'est pas respectée.

En résumé, le filtre est efficace et respecte parfaitement les valeurs trouvées dans la littérature et utilisées dans la phase de conception. De bons rendements ont été obtenus dans l'élimination des MEST, DBO₅, DCO et *E. coli*, grâce au mélange de plusieurs voies d'élimination: filtration, digestion microbiologique et action des racines des plantes. Cependant, malgré que les *E. Coli*, la DBO₅ et l'azote total ne répondent aux exigences de réutilisation de l'irrigation (OMS, FAO) et à la valeur limite d'évacuation des eaux usées du Sénégal NS 05- 061 juillet 2001, la qualité des effluents d'eaux usées après phytoépuration s'est améliorée. En effet, la faible réduction de l'azote et la non-conformité concernant les *E. coli* sont attendues dans la plupart des systèmes décentralisés et, par conséquent, un traitement tertiaire est généralement suggéré (par exemple une désinfection par UV, hypochlorite ou chlore) pour une réutilisation agricole (Agidi, 2013).

IV. CONCLUSION

L'étude concerne le Technopole de Dakar (Sénégal) où le problème de la gestion inappropriée des eaux usées avait été abordé. Le cadre territorial a révélé une nécessité de proposer une technologie simple, économique et facile à gérer, capable d'affiner le traitement des eaux usées qui ont contaminé la nappe phréatique et le lac, afin de réduire la charge de polluants avant de les rejeter dans l'environnement ou de la réutiliser en agriculture. Ainsi, la construction d'une installation pilote pour le traitement des eaux usées produites par la station d'épuration (STEP) du Technopole a été réalisé. La configuration du filtre horizontal est composée d'une fosse septique, d'une zone humide à flux horizontal submergé et d'un réservoir de stockage. Au terme de ce travail, nous avons un pourcentage global d'épuration de 69% des eaux usées mal traitées par la STEP à raison de 2 m³ par jour. En effet, la phytoépuration à travers le filtre horizontal a entraîné une réduction de 90,5% des MEST, 63,4% de la DBO₅, 74,7% de la DCO, 17,2% de l'azote total et 98,2% d'*Escherichia Coli*. Par ailleurs, un traitement tertiaire est recommandée, par exemple, une désinfection est suggérée par UV ou hypochlorite ou chlore pour une élimination des agents pathogènes mais également la nitrification et la dénitrification.

V. REMERCIEMENTS

Je remercie vivement pour le soutien du laboratoire de recherche sur les technologies appropriées pour la gestion de l'environnement dans les pays à revenu faible et intermédiaire (CeTAmb) de l'université de Brescia, l'Office Nationale de l'Assainissement du Sénégal (ONAS) et avec la collaboration de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

REFERENCES

- [1] Agidi, S., Vedachalam S., Mancl K., and Lee J. Effectiveness of onsite wastewater reuse system in reducing bacterial contaminants measured with human-specific IMS/ATP and qPCR. *Journal of Environmental Management* 115, 2013, 167-174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.021>
- [2] Akpo Y., 2006. Evaluation de la pollution des eaux usées domestiques collectées et traitées à la station d'épuration de Cambéréne (Dakar). Mémoire de diplôme d'études approfondies de productions animales. Université de Dakar, Sénégal, 2006.
- [3] ANDS (Agence National de la Statistique et de la Démographie). Situation économique et sociale de la région de Dakar de l'année 2007, 2008, 163 p.
- [4] ANDS (Agence National de la Statistique et de la Démographie). Situation économique et social. Eau et Assainissement. Ed 2014. Site web : www.ansd.sn

- [5] Badiane, S. D., Diouf, E., M'baye, E. Le Technopôle de Dakar, une zone humide dans l'agglomération dakaroise. Perception et perspectives de valorisation. Département de géographie, UCAD- Dakar, Section de géographie, UGB-Saint-Louis, 2017.
- [6] Bop D., Gueye M. T. Gestion des eaux usées et des boues de vidange à Dakar particulièrement dans la zone humide du Technopole. JUNCO – Journal of Universities and international development cooperation n. 2/2020. <http://www.ojs.unito.it/index.php/junco/issue>
- [7] Brix, H. Treatment of Wastewater in the Rhizosphere of Wetland Plants – The Root – Zone Method. *Water Science & Technology*, 1987, 19, 107-118. DOI: 10.2166/wst.1987.0193.
- [8] Byamukama, D., Mach, RL, Kansime, F., Manafi, M., & Farnleitner, AH. Efficacité de discrimination de la détection de la pollution fécale dans différents habitats aquatiques d'un pays tropical de haute altitude, en utilisant des coliformes présumés, *Escherichia coli* et des spores de *Clostridium perfringens*. *Microbiologie appliquée et environnementale*, 2005, 71 (1), 65-71.
- [9] Chernicharo, C.A.L. Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 2006, 5, 73–92.
- [10] Diawara, A. B. Les déchets solides à Dakar, 2009. Environnement, sociétés et gestion urbaine. Géographie. Thèse de doctorat de l'université Michel de Montaigne-Bordeaux III. Français, 2006. <tel-00466516>
- [11] Dotro, G. et al. Treatment wetlands in Biological Wastewater Treatment Series. IWA publishing, 2017.
- [12] Faye, S. C., Faye, S., Wohnlich, S., Gaye, C. B. An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Senegal). *Environmental Geology*, 2004, 45:312–322.
- [13] Gaye, M. et Niang, S. Manuel des bonnes pratiques de l'utilisation saine des eaux usées dans l'agriculture urbaine. ENDA RUP (Relais pour le Développement Urbain Populaire), Ouest Foire, BP 27 083, Malick Sy, Dakar – Sénégal, 2009.
- [14] Gueye M. T., Bop D., Ndoye A., Sorlini S. Utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation dans la zone humide du Technopole de Dakar: un risque d'insécurité alimentaire des cultures maraichères. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*. Vol. 33 No. 1 June 2022, pp. 645-655. ISSN: 2509-0119. <https://ijpsat.org/index.php/ijpsat/article/download/4428/2719>
- [15] Health Effects Institute, Health effects of outdoor air pollution in developing countries of Asia; a literature review. Boston, Health Effects Institute, 2004.
- [16] Javed M.T. Mechanisms behind pH changes by plant roots and shoots caused by elevated concentration of toxic elements, 2011.
- [17] Kadlec, RH et Wallace, S. Zones humides de traitement. 2e édition, Taylor & Francis, Boca Raton, 2009. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- [18] Lananan, F. Symbiotic bioremediation of aquaculture wastewater in reducing ammonia and phosphorus utilizing Effective Microorganism (EM-1) and microalgae (*Chlorella* sp.). Elsevier, 2014.
- [19] Montgomery, M, et al. Cities transformed: demographic change and its implications in the developing world. London, Earthscan, 2004.
- [20] Morel, A. et Diener, S. Gestion des eaux grises dans les pays à revenu faible et intermédiaire, examen des différents systèmes de traitement pour les ménages et le quartier. Institut fédéral suisse des sciences et technologies aquatiques (Eawag), SANDEC, Dübendorf, 2006.
- [21] Ndao, M. Dynamiques et gestions environnementales de 1970 à 2010 des zones humides au Sénégal : étude de l'occupation du sol par télédétection des Niayes avec Djiddah Thiaroye Kao (à Dakar), Mboro (à Thiès et Saint-Louis). Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, France, 2012.
- [22] N'diaye, A. A. Caractérisation des boues de vidange et performance de la déposante de Cambérène. Mémoire de fin d'études, EIER/2iE Dernière Promotion, 2007.

- [23] Norme Sénégalaise. Eaux usées, eaux de surface, souterraines, marines, pollution des eaux, charge polluante, épandage, valeurs limites des paramètres, milieux récepteurs, caractéristiques générales, effluents, voies d'évacuation, station dépuración. EAUX USEES : NORMES DE REJET, NS 05-061, Juillet 2001.
- [24] OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Volume 2 : Wastewater Use in Agriculture, Genève, Organisation mondiale de la santé, 2006.
- [25] ONAS (Office Nationale de l'Assainissement du Sénégal). Programme de gestion des boues de vidange : Boues mag. Magazine trimestriel du programme de boues de vidange N04 Décembre 2014.
- [26] RGPFAE (Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage). Agence National de la Statistique et de la Démographie. Projection de la population 2013-2063 du Sénégal/MEFP/ANSD- Août 2015.
- [27] Sy, M., Khouma, M., Ndong, M.S.G., Badiane, N. Y., Niang, Y., Diagne, M.O., Dial, M.L., Niang, I. et Diop, O. Renforcer la résilience des systèmes agricoles urbains: Évaluer l'agriculture urbaine et périurbaine à Dakar, Sénégal. [Padgham, J. et J. Jabbour (eds.)]. Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), Nairobi, Kenya, 2014.
- [28] USEPA (United State Environmental Protection Agency). Water Treatment Manual– Disinfection. Office of Research and Development Washington, 1995.
- [29] Vymazal, J., Brix, H., Perfler, R., Cooper, P. F., Haberl, R. and Laber, J., 1998. Removal mechanisms and types of constructed wetlands. Backhuys Publisher, Leiden, The Netherlands, 1998, pp 17-66.
- [30] Vymazal, J. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 2011, 674:133–156 DOI 10.1007/s10750-011-0738-9.
- [31] WWAP (World Water Assessment Program). Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2017. Les eaux usées – Une ressource inexploitée. Paris, UNESCO, 2017.