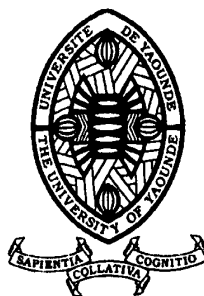


REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
ECOLE NORMALE SUPERIEURE
DEPARTEMENT DE DEPARTEMENT DE
CHIMIE



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
HIGHER TEACHER TRAINING COLLEGE
DEPARTMENT OF DEPARTMENT OF
CHEMISTRY

CARACTÉRISATION DES LIXIVIATS ET EAUX ENVIRONNANTES ET TRAITEMENT DES LIXIVIATS DE LA DECHARGE DE NKOLFOULOU SUR FILTRES PLANTES DE ROSEAUX

Mémoire présenté et soutenu publiquement en exigences des conditions
requisés pour l'obtention du Diplôme de Professeur de l'Enseignement
Secondaire Deuxième Grade(DI.P.E.S.II)

Par :

NCHINMOUN MOHAMED
Titulaire d'une Licence en Chimie

Sous la direction
CHARLES FON ABI
Maître de Conférences

Année Académique
2015-2016





AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire de Yaoundé I. Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : biblio.centrale.uyi@gmail.com

WARNING

This document is the fruit of an intense hard work defended and accepted before a jury and made available to the entire University of Yaounde I community. All intellectual property rights are reserved to the author. This implies proper citation and referencing when using this document.

On the other hand, any unlawful act, plagiarism, unauthorized duplication will lead to Penal pursuits.

Contact: biblio.centrale.uyi@gmail.com

Certification

Je soussigné, **Pr. FON ABI Charles** atteste que les travaux effectués par l'étudiant **NCHINMOUN MOHAMED**, matricule **09T0619**, dans le cadre de son mémoire de **DI.P.E.S.II** intitulé : **CARACTERISATION DES LIXIVIATS ET EAUX ENVIRONNANTES ET TRAITEMENT DES LIXIVIATS DE LA DÉCHARGE DE NKOLFOULOU SUR FILTRES PLANTÉS DE ROSEAUX**, sont ses propres travaux et ont été réalisés dans le Laboratoire de Chimie Inorganique de l'École Normale Supérieure de Yaoundé sous ma direction.

Ces travaux n'ont jamais été présentés devant un jury dans le cadre d'un mémoire ou d'une thèse.

Yaoundé, le

Le Directeur de Mémoire

Pr. Charles FON ABI

Maîtres de conférences

DÉDICACE

Je dédie très affectueusement ce travail à :

Mon père

MEFIRE ISMAÏLA

À

Ma mère

MAGNEROU CHÉTOU

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné la force et le courage de réaliser ce travail et j'exprime toute ma profonde gratitude à tous, ainsi qu'à toutes les structures qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Il s'agit particulièrement :

— Du Professeur FON ABI Charles, Chef de Département de Chimie de l'École Normale Supérieure de Yaoundé, par ailleurs Superviseur de mémoire, qui m'a initié à la recherche à travers ce sujet qu'il m'a proposé, m'a suivi de bout en bout et dont la disponibilité, le dynamisme, le dévouement au travail bien élaboré, l'esprit critique, les conseils mais surtout, la rigueur dans le travail ont été pour moi d'un apport incommensurable et m'ont permis d'avoir une idée de la recherche. Qu'il veuille trouver ici toute ma sincère reconnaissance. Mais aussi pour son dynamisme et son dévouement à la tête de ce Département.

— De Monsieur FENDOUNG DEJIANG Guy Hector qui m'a suivi de bout en bout et dont la disponibilité, le dynamisme, le dévouement au travail bien élaboré, l'esprit critique, les conseils mais surtout, la rigueur dans le travail ont été pour moi d'un apport incommensurable et m'ont permis d'avoir une idée de la recherche. Qu'il veuille trouver ici toute ma sincère reconnaissance

— Des Enseignants du Département de Chimie parmi lesquels les Professeurs LAMBI NGOLUI John, LENTA NDJAKOU Bruno, KAPCHE WABO Gilbert Deccaux, GOUET BEBGA, KOUAM FOGUE Siméon, WAFO Pascal, les Docteurs NGANSOP René, MBOUOMBOUO Ibrahim, NGUETEU KAMLO Alexis, et ceux des Départements de Physique et Sciences de l'Éducation de l'École Normale Supérieure de Yaoundé, pour leur disponibilité et la qualité de la formation qu'ils m'ont donnée.

— Des membres du Laboratoire de Chimie Inorganique de l'École Normale Supérieure de Yaoundé, pour la préparation des échantillons d'analyses, du Laboratoire de Biotechnologie Végétales Environnementaux de l'Université de Yaoundé 1, pour les caractérisations expérimentales des lixiviats dans le cadre de ce travail.

— De mes amis MFOUAPON Alassa, NFOUNDIKOU Ismael, NJIMBOUOTNJE Arouna, NJOKAM LINE Laure et MAIMUNA Iya yaya, pour leurs esprits d'équipes et de solidarité.

— De mes frères et mes sœurs : KOUOTOU Zakari, NSANGOU Yacouba, NCHINMOUN Issoufa, MOULIOM Ayouba ; MBOUDOUO Mohamed, MASSAPCHOURAP Roukaya et YAMGOUOT Samira, pour leurs soutiens, leurs encouragements et leurs conseils à mon égard.

— De ma grande mère MEWOUOH Adama et de mon grand-père NDAPEYOUONE Ibrahim pour leurs encouragements.

— De mes cousins NDAPEYOUONE Nouhou, NDAPEYOUONE Amidou, MOUNTA APOUYI Loudi et TAYOU Iliassou pour leurs encouragements.

— De toutes mes belles-sœurs, pour leurs encouragements.

— De tous ceux qui de près ou de loin ayant apporté d'une manière quelconque, leur aide pour la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

<i>Certification</i>	ii
<i>DÉDICACE</i>	iii
<i>REMERCIEMENTS</i>	iv
<i>SOMMAIRE</i>	v
<i>RÉSUMÉ</i>	ix
<i>ABSTRACT</i>	x
<i>LISTE DES ABREVIATIONS</i>	xi
<i>LISTE DES FIGURES</i>	xii
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
PROBLÉMATIQUE.....	2
OBJECTIF :.....	2
PLAN DU TRAVAIL.....	2
CHAPITRE I : RÉVUE DE LA LITTÉRATURE.....	2
I. LES LIXIVIATS.....	3
I.1 Généralités.....	3
I-2. Fonctionnement d'une décharge.....	3
I.3. Mode de formation des lixiviats.....	4
I.4. Impact des lixiviats sur l'environnement et la santé humaine.....	5
I.4.1. Pollution par les microorganismes.....	5
I.4.2. Pollution par les matières organiques et minérales.....	5
I.4.3. Pollution par les métaux lourds.....	6
I.5. La décharge de Nkolfoulou.....	6
I.5.1. Données climatiques.....	6
I.5.2. Hydrologie du site.....	7
I.5.3. Localisation géographique de la décharge de Nkolfoulou.....	8
I.5.4. Présentation de la décharge de Nkolfoulou.....	9
I.5.5. Type de déchets déversés sur le site.....	10
I.5.6. Les lixiviats sortant du site.....	12

I-6. Les différentes méthodes traitements des lixiviats	13
I-6.1. Les méthodes biologiques	13
I-6.1.1. Traitement aérobie	13
I-6.1.2. Traitement anaérobies.....	13
I-6.2. Les méthodes physico-chimiques.....	13
I-6.2.1. Flottation.....	13
I-6.2.2. Coagulation-Floculation	14
I-6.2.3. Précipitation chimique.....	14
I-6.2.4. L'adsorption.....	14
I-6.3. Méthodes membranaires	14
I-6.3.1. La nanofiltration	14
I-6.3.2. L'osmose inverse.....	15
I-7. Les filtres plantés de roseau.....	15
I-7.1. généralité et définition.....	15
I-7.2. Le principe de fonctionnement.....	15
I-8. Les mécanismes d'épuration et les critères de conception et dimensionnement des filtres plantés de roseau	15
I-8.1. Les mécanismes d'épuration	16
I-8.1.1. L'élimination de la DBO / DCO et des MES	16
I-8.1.2. L'élimination de grande quantité d'azote ammoniacal	17
I-8.1.3. Elimination des quantités considérable de fer	19
I-8.1.4. Réduction des hydrocarbures volatiles	19
I-8.1.5. Réduction des éléments traces toxiques	19
I-8.1.6. Elimination et stockage des traces de métaux	19
CHAPITRE II : PARTIE EXPERIMENTALE	21
II. MATÉRIELS, ECHANTILLONNAGE ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	22
II.1. Produits chimiques utilisés et matériels.....	22
II.1.1. Produits chimiques	22
II.1.2. Verrerie et appareillage	22
II.2. Traitement de lixiviats par le système de filtres plantés de roseaux	23
II.2.1. Types de filtres plantés de roseaux	23
II.2.1.1. Les filtres plantés à écoulement sous surfacique (SESS).....	24
II.2.1.2. Les filtres plantés à écoulement surfacique (SES)	24
II.2.1.3. Les FPR à écoulement mixte.....	25
II.2.2. Système de filtres plantés de roseaux.....	25

II.3. Méthodologie et points d'échantillonnage.....	26
II.3.1. Méthodologie	27
II.3.1. points d'échantillonnage	27
II.4. Techniques d'échantillonnage et d'analyse	29
II.5. Préparation des échantillons avant analyses et méthodes d'analyses (voir annexe 2). 30	
Protocole	30
CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	32
III.1. LA CHARGE POLLUANTE DES RIVIÈRES DU SITE DE NKOLFOULOU	33
III.1.1. L'effet de la charge polluante sur la conductivité.....	33
III.1.2. L'effet de la charge polluante sur la DCO des eaux environnantes de la décharge.....	34
III.1.3. L'effet de la charge polluante sur l'azote et le phosphore	35
III.1.4. L'effet de la charge polluante sur le pH.....	36
III.2. LA CHARGE POLLUANTE DES LIXIVIATS FILTRÉS DANS LES DIFFÉRENTES ZONES	36
III.2.1. Effet la charge polluante sur la DCO des lixiviats filtrés.	37
III.2.2. Effet de la charge polluante sur la conductivité des lixiviats filtrés.	38
III.2.3. La charge polluante en azote dans les lixiviats filtrés.....	39
III.2.4. L'effet des charges polluantes des lixiviats sur le pH.....	39
III.3. LA CHARGE POLLUANTE DES LIXIVIATS BRUTS.....	40
III.4. COMPARAISON DE LA CHARGE POLLUANTE DES BRUTS ET DES LIXIVIATS FILTRÉS	42
III.5. CHARGE POLLUANTE DES LIXIVIATS DU SYSTEME DE TRAITEMENT DE FILTRÉS PLANTES DE ROSEAUX.....	43
III.5.1. Charge polluante des lixiviats du système de traitement de filtres plantes de roseaux du 22 mars 2016	43
III.5.1.1 Effet de la charge polluante sur la conductivité	43
III.5.1.2. Effet de la charge polluante sur la DCO	44
III.5.1.3. La charge polluante en azote et en phosphore dans les lixiviats du système de traitement.	44
III.5.2. Charge polluante des lixiviats du système de traitement de filtres plantes de roseaux du mois d'avril 2016	45
III.5.2.1. Effet de la charge polluante sur la conductivité	46
III.5.2.2. Effet de la charge polluante sur la DCO	46
III.5.2.3. La charge polluante en azote et en phosphore dans les lixiviats du système de traitement du mois d'avril.....	47
INTERETS PEDAGOGIQUE	50

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	52
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54
ANNEXES	58
ANNEXE 1	59
ANNEXE 2	60

RÉSUMÉ

Les lixiviats et les eaux environnantes de la décharge de Nkolfoulou ont été caractérisés dans ce travail afin de connaître le niveau de pollution présent dans ces eaux. Par la suite le traitement des lixiviats à l'aide du système de filtres plantés de roseaux a été effectué. Pour se faire, des prélèvements ont été effectués en mars et avril 2016. Le pH et la conductivité de tous les échantillons ont été déterminés lors des prélèvements. Pour déterminer la teneur en matière organique grâce à la demande chimique en oxygène, l'azote et le phosphore, les échantillons prélevés ont été analysés en effectuant une digestion acide suivie de la mesure de la concentration au spectrophotomètre. En mars, treize échantillons ont été prélevés en une seule campagne : trois au niveau du fleuve Nfoulou à des points différents, deux au niveau des ruisseaux situés en amont et en aval, cinq dans la décharge au niveau des bassins de traitement (bassin 1 et 2) et des zones de pompage des lixiviats (zones 3A, 3E et 3C) et trois sur le système de traitement à l'entrée du filtre 1, à la sortie du filtre 1 et à la sortie du filtre 2. En avril, quatre échantillons ont été prélevés en deux campagnes au niveau du bassin 1 et au niveau du système de traitement. Les échantillons de Mars et d'Avril ont été filtrés et analysés afin de déterminer tous les paramètres précités.

Les résultats obtenus révèlent que les valeurs moyennes de DCO (102 mg/L), du pH (7,3), et de l'azote (11 mg/L) dans la rivière Nfoulou sont élevées par rapport aux normes imposées par l'OMS pour l'eau potable qui sont respectivement 13,80 mg/L pour la DCO, de 5,8 pour le pH et de 0,1 mg/L pour l'azote. Pour le système de traitement il y a eu un abattement de 73,24% de DCO et de 83% d'Azote résultant des valeurs moyennes de 83,66 mg/L de DCO et de 3,17 mg/L d'azote contenus dans les lixiviats à la sortie du filtre 2 qui sont inférieures aux normes de rejet des eaux usées qui sont de 300 mg/L et 30 mg/L respectivement pour la DCO et pour l'azote fixées par l'OMS. Les résultats obtenus montrent que le système de filtres plantés de roseaux est efficace pour le traitement des eaux usées.

Mots clés : Décharge, Lixiviats, Filtres plantés, Eaux usées, Adsorption

ABSTRACT

The leachates and water of surrounding water bodies of the landfill of Nkolfoulou were characterized in this work in order to determine the pollution level present in the water. Thereafter the treatment of the leachates using the pilot reed bed filtration system was carried out. To do this, the samples were collected in March and April 2016. The pH and the conductivity of all the samples were determined in situ. The organic matter content was determined thanks to the chemical demand for oxygen, the nitrogen and phosphorus, the samples collected were analyzed by carrying out an acid digestion followed by the measurement of the concentration using a spectrophotometer. In March, thirteen samples were taken in only one shift: three on the level of the Nfoulou river at different points, two on the level of the brooks located upstream and downstream, five in the landfill treatment basin (basin 1 and 2) and at the pumping areas of the leachates (zone 3A, 3E and 3C) and three on the treatment system at the entry of filter 1, the outlet side of filter 1 and the exit of the filter 2. In April, four samples were taken in two shifts on the level of basin 1 and the level of treatment system. The samples of March and April were filtered and analyzed in order to determine all the above mentioned parameters.

The results obtained reveal that the average values of DCO (102 mg/L), the pH (7,3), and the nitrogen (11 mg/L) in the Nfoulou river are high compared to the standards fixed by WHO for potable water which are respectively 13,80 mg/L for the DCO, of 5,8 for the pH and 0,1 mg/L for nitrogen. This high values imply that the treatment Centre installed in the landfill is not sufficient. For the treatment system, a reduction of 73, 24% of DCO and 83% of Nitrogen contents was observed resulting in the average values of 83.66 mg/L DCO and 3.17 mg/L nitrogen content in the effluents stream on the outlet side of filter 2 which are lower than the standards values, 300 mg/L and 30 mg/L respectively for DCO and nitrogen, fixed by WHO. The results obtained show that the reed bed filter system is efficient for waste water treatment.

Key Words : Leachates, Landfill, Bed Filters, Wastewater, Adsorption .

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR	:	Agence Française de Normalisation
ADEME	:	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AVG	:	Acide Gras Volatils
COV	:	Composé Organique Volatils
CSD	:	Centre de Stockage des Déchets
CT	:	Carbone Total
CUY	:	Communauté Urbaine de Yaoundé
DBO₅	:	Demande Biologique en Oxygène au bout de 5 jours
DCO	:	Demande Chimique en Oxygène
FH	:	Flux Horizontal
FPR	:	Filtre Planté de Roseau
FV	:	Flux Vertical
HYSACAM	:	Hygiène et de Salubrité du Cameroun
ISO	:	International Organisation for Standardization
MES	:	Matières En Suspensions
MINEPDED	:	Ministère de l'Environnement de la Protection de la Nature et Développement Durable
N_T	:	Azote total
P_T	:	Phosphore total
POA	:	Procédé d'Oxydation Avancé
PCBs	:	Polychlorure de Bisphényles
PCV	:	Polychlorure de Vinyle
SST	:	Total Suspended Solid
SES	:	Système à Ecoulement Surfaccique
SESS	:	Système à Ecoulement Sous-Surfaccique

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Répartition mensuelle des précipitations et des températures de la ville de Yaoundé.....	7
Figure 2: Présentation du site d'étude	8
Figure 3: Présentation de la décharge de Nkolfoulou	10
Figure 4: Les différents types de filtres plantés de roseaux	24
Figure 6: Diagramme schématique d'un FPR à écoulement horizontal	25
Figure 7: Système de filtres plantés de roseaux.....	26
Figure 8: Points d'échantillonnages et écoulements des Lixiviats vers l'environnement	28
Figure 9: Conductivité des eaux environnantes de la décharge.	33
Figure 10: DCO des eaux non filtrées.	34
Figure 11: Évolution de l'azote	35
Figure 12: Évolution de la DCO des lixiviats filtrés du mois de Mars 2016	37
Figure 13: Évolution de la conductivité des lixiviats filtrés.	38
Figure 14:Évolution de l'azote des lixiviats filtrés	39
Figure 16: Azote des lixiviats bruts	40
Figure 15: DCO des lixiviats brut	40
Figure 17: évolution de la conductivité des lixiviats du système de traitement	43
Figure 18:évolution de la DCO des lixiviats du système de traitement.	44
Figure 19:évolution de l'azote dans système	44
Figure 20:évolution du phosphore dans le système	44
Figure 21: évolution de conductivité des lixiviats du système de traitement d'avril.	46
Figure 22: Evolution de DCO des lixiviats du système de traitement d'avril 2016	46
Figure 23: évolution d'azote de lixiviats du système	47
Figure 24: évolution de phosphore du système	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition des déchets entrant dans le CSD de Nkolfoulou	11
Tableau 2: Analyse des lixiviats de Nkolfoulou	12
Tableau 3: Produits chimiques utilisés dans cette étude.	22
Tableau 4: La Charge polluante des rivières du site de Nkolfoulou prélevés en fin Mars 2016	33
Tableau 5 :La Charge polluante des lixiviats filtrés des différentes zones prélevée en fin Mars 2016.....	36
Tableau 6: La charge polluante des lixiviats bruts	40
Tableau 7: comparaison de la charge polluante des lixiviats bruts et des lixiviats filtrés ...	42
Tableau 8: charge polluante de lixiviats traités sur filtres plantés.	43
Tableau 9: charge polluante de lixiviats traités sur filtres plantés en avril 2016.	45



INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONTEXTE

Partout dans le monde, la gestion des déchets est devenue un enjeu important pour la préservation de l'environnement et de la santé. Dans les pays industrialisés, des réglementations spécifiques et des moyens techniques de plus en plus sophistiqués sont progressivement mis en place. Mais dans les pays en développement la situation est complexe **(Zahrani.2006)**.

Du fait de manque de la politique municipale de tri, les décharges urbaines des villes africaines plus particulièrement la ville de Yaoundé continuent d'être des dépotoirs de tous types de polluants avec pour conséquence leur présences dans les lixiviats résultant.

Les lixiviats qui proviennent des décharges, peuvent avoir un impact négatif sur les milieux récepteurs. A savoir la pollution et la dégradation des milieux environnants ; des eaux souterraines et de surfaces. Cet impact a pour conséquences des graves maladies ; à savoir les maladies hydriques, des mal formations... causées par des polluants tels que : les métaux lourds, les hydrocarbures (totaux et aromatiques) les agents pathogènes et toute une panoplie de polluants dits "émergents" tels que les hormones de synthèse, les pesticides etc **(Djombé. 2013)**.

Au Cameroun plus particulièrement dans la capitale politique Yaoundé, le traitement des lixiviats est sous la responsabilité de l'entreprise concessionnaire chargée de la collecte des déchets à savoir HYSACAM qui n'utilise que le système traditionnel de marais naturel dont les limites ne sont plus à démontrer. D'après les travaux antérieurs **(Ekani. 2015)** qui portaient sur la caractérisation des lixiviats et des eaux environnantes ; nous avons constaté réellement qu'il n'y a pas de traitement proprement dit des lixiviats avant tout rejet dans la nature.

Sachant donc que le déversement des ordures sur le site de décharge de NKolfoulou à Yaoundé se fait quotidiennement avec des charges de 1200 tonnes par jour **(Sotamenou. 2005)** et que la qualité des lixiviats est évolutive en fonction de la composition des déchets, il est impératif de trouver un système de traitement moderne localement adapté, peu couteux et respectueux de l'environnement capable de porter la qualité des lixiviats aux normes internationales avant leurs rejet dans la nature. Un tel système de traitement dans le niveau de connaissance actuel demeure les filtres plantés de roseaux optimisés **(Avila et Al, 2014)**.

PROBLÉMATIQUE

Du fait de manque de traitement des lixiviats, couplé aux problèmes sanitaires provoqués par la décharge de Nkolfoulou (**Guy Djombé.2013**), le souci majeur demeure la préservation de la santé et de l'environnement.

Les taux élevés des charges organiques, minérales et pathogènes respectivement estimées par la DBO, DCO, phosphore et l'azote; les métaux lourds et les microorganismes totaux ; sont responsables de la nuisance des lixiviats. Ces taux étant supérieurs à la norme, peuvent contaminer soit les cours d'eau avoisinant la décharge par ruissellement soit les eaux souterraines par infiltration qui provoquent ainsi des graves maladies.

Ce travail permettra de réduire à la normale en utilisant les filtres plantés de roseaux le taux de la charge polluante afin de minimiser le degré de nuisance des lixiviats provenant de la décharge sur les milieux récepteurs que sont le fleuve et les eaux avoisinant la décharge.

OBJECTIF :

Réduire à la normale le taux de la charge polluante présente dans les lixiviats de la décharge de Nkolfoulou.

PLAN DU TRAVAIL

Ce travail est structuré en trois parties:

La première partie de ce mémoire sera consacrée à l'étude bibliographique portant sur les lixiviats et les différentes méthodes de traitements de lixiviats.

La deuxième partie, consacrée aux techniques expérimentales, nous décrivons les méthodes expérimentales, le matériel et les réactifs employés, ainsi que les méthodes analytiques utilisées.

La troisième partie sera réservée à la présentation de l'ensemble des résultats trouvés, une interprétation de ses résultats qui sera suivie de la discussion.

Une conclusion générale ainsi que quelques perspectives seront présentées à la fin de ce manuscrit.



CHAPITRE I : RÉVUE DE LA LITTERATURE

I. LES LIXIVIATS

I.1 Généralités

Dans une décharge, l'eau est le principal agent vecteur pour son évolution. Les entrées d'eau dans une décharge sont constituées de précipitations directes auxquelles s'ajoute l'eau apportée par les déchets eux-mêmes et celles de ruissellement qui entrent dans les casiers de stockage.

Dans les décharges où les déchets sont moins dangereux, l'eau favorise la transformation bio-physico-chimique des déchets, ainsi nous pouvons assimiler le fonctionnement d'une décharge à celui d'un réacteur complexe à multi-compartiments (biologique, minéral et organique) qui sont en permanence en contact les uns avec les autres et qui réagissent de façon interactive (**Souhaila, 2012**).

L'ensemble de ces phénomènes conduit à la génération de métabolites gazeux, du biogaz et à l'entraînement par l'eau de molécules diverses qui donnent lieu à des lixiviats, tous sont des vecteurs essentiels de la charge polluante des centres de stockage de déchets non dangereux (**Souhaila, 2012**).

I-2. Fonctionnement d'une décharge

Le fonctionnement d'une décharge peut être assimilé à un réacteur bio-physico-chimique donnant lieu à des réactions et à des évolutions complexes qui aboutissent à la transformation chimique, physique et biologique des déchets (**Souhaila ; 2012**). Du fait des conditions géologiques et hydrologiques du site, de la nature des déchets stockés et du mode de gestion de l'exploitation, chaque décharge est un cas unique. Il n'est donc pas envisageable de déterminer avec précision un mode d'évolution qui serait applicable à tous les centres (**Souhaila, 2012**).

Cependant, certains phénomènes sont communs à la majorité des sites et peuvent être quantifiés permettant ainsi de caractériser l'évolution d'une installation de stockage, en particulier, en ce qui concerne les aspects biologiques, physico-chimiques, hydrauliques et géotechniques (**Souhaila, 2012**).

Les matières biodégradables mises en décharge font l'objet d'une évolution biologique sous l'action des bactéries aérobies puis des bactéries anaérobies (**Souhaila, 2012**).

En l'absence de dispositions particulières, l'eau qui s'écoule à travers la masse des déchets produit des lixiviats en se chargeant de substances chimiques ou biologiques (**Souhaila, 2012**).

Des transformations chimiques ou physiques conduisent à la destruction partielle de la matière et à la solubilisation de certaines espèces ou à leur transformation en gaz (**Souhaila, 2012**).

I.3. Mode de formation des lixiviats

Les lixiviats sont produits lorsque la teneur en humidité dépasse la valeur maximale de rétention qui est définie comme la valeur maximale de liquide que peut retenir un milieu poreux sans produire de percola. Ce processus dépend de plusieurs facteurs (**Souhaila, 2012**) :

- ❖ Facteurs climatiques et hydrogéologiques : les pluies, la neige, l'intrusion des eaux souterraines ;
- ❖ Qualité des déchets : l'âge, la perméabilité, la teneur initiale en humidité, la taille des particules... ;
- ❖ L'exploitation et la gestion du site : compactage, végétation, couverture, recirculation, irrigation... ; (**Souhaila, 2012**).

- ❖ Mécanismes internes : décomposition des composés organiques, formation de biogaz et de la chaleur. Après la première dégradation aérobie au début de l'enfouissement, la première phase de décomposition anaérobie est une fermentation acide ; les percolats jeunes sont riches en acides gras volatils (AGV) qui peuvent représenter jusqu'à 95% du carbone organique total, ce caractère acide du lixiviat permet de solubiliser les métaux présents dans les déchets. Au cours du temps, l'évolution biologique complémentaire consiste en une digestion anaérobie pendant laquelle les AGV sont métabolisés. Les produits résultants de cette métabolisation sont des gaz (CO₂ et CH₄ essentiellement) et des molécules stabilisées (acides fulviques et humiques). Dès lors, au fur et à mesure de son vieillissement, une décharge produira un lixiviat de plus en plus pauvre en AGV ou en petites molécules biodégradables.

Parallèlement, le lixiviat verra sa charge en molécules de hauts poids moléculaires augmenter : c'est le phénomène d'humidification (**Kanga et Al.,2002**).

I.4. Impact des lixiviats sur l'environnement et la santé humaine

Suite au dépôt dans une décharge, les déchets sont soumis à des processus de dégradation liés à des réactions biologiques et physico-chimiques complexes. L'eau s'y infiltre et produit des lixiviats et du biogaz chargés en substances organiques ou minérales qui engendrent une pollution essentiellement de type organique et métalliques avec la biodégradation naturelle des déchets confinés avec leurs composants anthropiques qui libèrent de nombreuses substances toxiques dans le milieu naturel (**Djombé , 2013**).

Sur les sites de décharges, on rencontre essentiellement trois types de pollution : **pollution par les matières organiques et/ou minérales, pollution par les métaux lourds et par les microorganismes.**

D'après une étude toxicologique officielle conduite dans 56 décharges de déchets municipaux au Cameroun (Bamenda et Yaoundé), 133 produits chimiques toxiques (dont 32 causent le cancer, 10 causent des malformations cardiaques et 21 causent des endommagements génétiques) ont été mis en évidence comparé à 72 produits dans les décharges industrielles (**Bessala., 2003**).

I.4.1. Pollution par les microorganismes

Plusieurs **maladies hydriques** sont causées par la consommation des eaux contaminées par les lixiviats qui contiennent des microorganismes pathogènes. Durant la dernière décennie, les problèmes relatifs à l'eau sont devenus de plus en plus vastes, avec l'émergence de nouvelles maladies infectieuses et la réémergence d'autres qui sont déjà connues, (salmonelle, choléra, shigellose) (**Kehila et Al.,2007**).

I.4.2. Pollution par les matières organiques et minérales

La composition des lixiviats est une photographie de l'état des déchets à un certain moment de leur dégradation, (**Christensen et al., 1996**). En étudiant plusieurs sites, on définit les fourchettes de fluctuations de la composition physico-chimique des lixiviats d'ordures ménagères. La fraction minérale des lixiviats est essentiellement constituée de chlorures, sulfates, bicarbonates, potassium, sodium et ammonium. La partie organique est liée à l'âge

des déchets. La matière organique peut se retrouver dans les eaux de surface et souterraines quand les conditions minimales d'enfouissement de déchets ne sont pas respectées.

Cependant, même si dans certaines décharges on assiste à la mise en place des géo membranes, la durée de vie de ces matériaux est mal connue vu qu'ils sont soumis à l'agressivité chimique des lixiviats. Une éventuelle fuite dans ces membranes peut occasionner la contamination de la nappe phréatique (**Souhaila, 2012**).

I.4.3. Pollution par les métaux lourds

La migration des métaux lourds dans les sols (à partir de décharge des déchets suite à la lixiviation) et leur infiltration vers les eaux souterraines met en jeu un grand nombre de phénomènes : solubilisation à pH acide, complexion par la matière organique de type humique, précipitation à pH basique, rétention des matières en suspension sur des particules de sol, adsorption des ions ou des molécules à la surface des grains de matrice poreuse, phénomène d'échange d'ions (**Lagier, 2000**).

I.5. La décharge de Nkolfoulou

I.5.1. Données climatiques

La ville de Yaoundé se trouve en zone tropicale où règne un climat subéquatorial Guinéen caractérisé par quatre saisons alternées (**Kengne., 2008**) à savoir : deux saisons sèches et deux saisons de pluies réparties ainsi :

- ✓ Une longue saison sèche allant de mi- Novembre à mi-mars;
- ✓ Une courte saison de pluie de mi-mars à Juin;
- ✓ Une courte saison sèche de Juillet à Août;
- ✓ Une longue saison pluie de Septembre à mi-novembre.

Les températures journalières varient entre 23 et 35 °C. Le diagramme ombrothermique du site est présenté dans la figure 1.

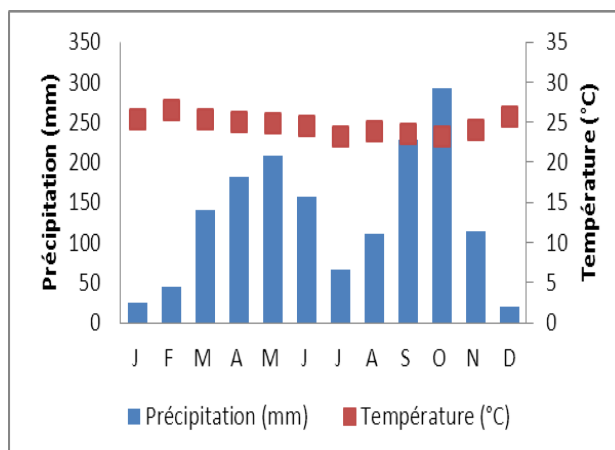


Figure 1: Répartition mensuelle des précipitations et des températures de la ville de Yaoundé

La température moyenne annuelle de Yaoundé et de Nkolofoulou se situe autour de 24,5 °C. Février est le mois le plus chaud avec une moyenne de l'ordre de 25 °C. La pluviométrie moyenne est d'environ 1500mm d'eau/an. Octobre est le mois le plus pluvieux avec une moyenne de 273mm tandis que Janvier (14mm) est le mois le plus Sec de l'année (**Zahrani., 2006**).

I.5.2. Hydrologie du site

Le site de Nkolofoulou est situé dans le bassin versant de la rivière Nfoulou, avec un réseau hydrographique simple, composé de quelques affluents localisables (Otontong, Ebengui, Akoo, Voumudi). Ces affluents se transforment en torrents en période de grandes pluies. Plusieurs aménagements et constructions ont été réalisés dans le bassin de Nfoulou tels que le CSD de Nkolofoulou, l'Université de Yaoundé II à Soa, des routes et des quartiers résidentiels. La rivière Nfoulou s'écoule vers l'Afamba, qui se jette dans la Sanaga.

Il est le milieu récepteur des rejets hydrique de la décharge de Nkolofoulou et des eaux de ruissellement d'origine diverses (**MINMEE., 2004**)

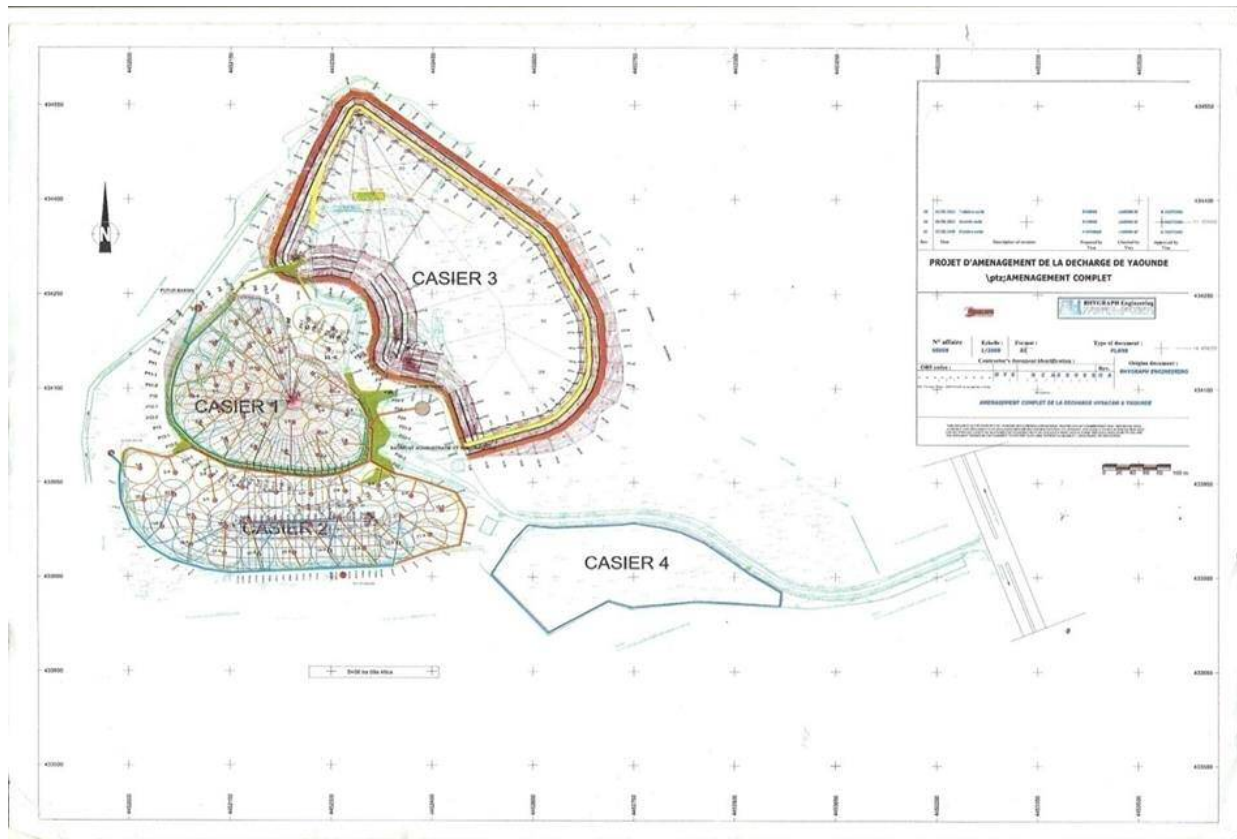


Figure 2: Présentation du site d'étude

I.5.3. Localisation géographique de la décharge de Nkolfoulou

La commune de Soa est située à une vingtaine de kilomètres de Yaoundé. C'est dans cette commune voisine située au nord Est de la ville que la CUY a acquis dans les années 80 un terrain d'une cinquantaine d'hectares. La ville de Soa comptait environ 3 200 habitants en 2001 (**Bessala., 2003**).

Depuis la reprise des activités d'HYSACAM à Nkolfoulou le 1er Septembre 1985, la société s'est attelée à une meilleure communication et surtout au dialogue. Les risques de pollution à la décharge surtout celle des eaux sont importantes. Les populations ont obtenu de HYSACAM la construction de trois bornes fontaines dans les villages.

Un comité de suivi des activités de la décharge a été créé. On trouve au sein de ce comité le Maire de Soa, les chefs et quelques notables des trois villages, des représentants de la société. Le comité se réunit une fois par trimestre à la Mairie de Soa afin de vérifier les activités qui s'y déroulent. C'est au sein de ce comité que le contrôle systématique de la dératisation et la désinsectisation trimestrielle de la décharge est effectué. La discussion autour des projets et

des activités de la décharge est permanente avec les populations riveraines et municipales (CUY et SOA). Ce souci de transparence permet ainsi à HYSACAM et ses partenaires de vivre en bonne intelligence et d'anticiper sur les éventuels problèmes (Ekani., 2015).

I.5.4. Présentation de la décharge de Nkolfoulou

Évaluer les charges entrant ainsi qu'un parking ont été aménagés. Une baraque de mécanicien, les vestiaires pour les ouvriers, un système d'alimentation d'eau et une pompe à gasoil ont également été recensés sur le site.

L'une des valorisations des déchets développées ici est l'épandage des résidus sous forme de compost. Un champ communautaire a donc été développé pour tester la qualité du compost produit.

Les éléments de stockage décrits ici sont constitués de quatre casiers et un bac de rétention des lixiviats.

- ❖ Casier de la période d'exploitation 1998 – 2003 : sa surface est de 5,1ha, sa profondeur peut être estimée à 6m couvert d'une couche de terre et de plantes qui ont repoussés.
- ❖ Casier d'exploitation 2003 – 2004 : est recouverte d'une couche d'argile d'une épaisseur de 0,75m. Les lixiviats et les eaux pluviales y sont drainés par une canalisation à ciel ouvert.
- ❖ Un casier expérimental 2004 – 2006 : Il a permis de réaliser les études ayant contribué à la maîtrise du biogaz produit par l'installation d'un système de captage.
- ❖ Nouveau Casier 2006 – aujourd'hui : de volume 76 000m³ Il a été creusé sur environ trois années de 2002 à 2005, il reçoit actuellement tous les déchets entrant sur le site.
- ❖ Un bac de rétention des lixiviats. Il se trouve juste au-dessous de l'ancien casier (1998 – 2003) et est composé de trois petits bassins en cascade. Il a été rénové en 2006 et permet de collecter les lixiviats les « traiter » avant le rejet dans le fleuve Nfoulou. Le premier bassin a un volume de 40m³ alors que les autres ne sont que de 20m³ (MINEPDED., 2012).

Conscient du fait que les risques de pollution de la décharge surtout celle des eaux sont importants par les lixiviats, elle a commencé par implanter un système de lagunage sur le site. Ensuite, une unité de captage de biogaz et incinération sous forme de torchère a été installée en 2011 (Ekani., 2015). C'est dans le cadre de la continuité de ces efforts d'assainissement que ce travail va permettre de connaître le niveau de la pollution afin d'apporter une solution à ce problème.



Figure 3: Présentation de la décharge de Nkolfooulou

I.5.5. Type de déchets déversés sur le site

Les activités de stockage d'ordure ménagère ont commencé sur le site par la société d'Hysacam depuis le 1er Septembre 1985. Ce sont au total 1200 tonnes de déchets qui sont traitées par jour sur les 1800 tonnes produites par la ville de Yaoundé (Zahrani., 2006).

Après la collecte dans les poubelles au niveau des ménages, les ordures sont transportées dans des bacs métalliques aménagés à cet effet. Au niveau des marchés municipaux, un ou plusieurs bacs sont également disposés pour déverser tous les ordures.

Comme au Cameroun la sensibilisation au tri sélectif n'est pas répandue dans la population, on peut retrouver dans les bacs tous types de déchets. Les bacs sont situés à des points précis, et connus des populations des quartiers et de la zone desservie. Les camions

chargeurs collectent les bacs et leurs contenus vers la décharge. Le contenu des camions est représenté sur le tableau 1.

Tableau 1: Composition des déchets entrant dans le CSD de Nkolfoulou (Zahrani., 2006)

Fraction (%) Haut	Haut standing	Moyen standing	Habitat spontané	Marché	Périurbain
Bois	0,2	1,1	0,5	1,9	0,4
Caoutchouc	0,0	0,0	1,8	1,2	0,0
Carton	5,4	3,0	1,5	13,5	4,6
Papier	10,0	3,8	1,0	3,7	3,1
Dangereux	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Gravats	2,0	0,4	1,1	0,3	0,8
Métaux	1,5	0,9	1,2	1,7	1,0
Plastiques	7,0	8,0	12,2	6,6	7,9
Textile	4,6	5,0	6,0	2,6	3,2
Verres	1,5	1,0	1,2	0,6	1,4
Matière organique	62,2	70,4	65,7	63,7	66,5
Elément fin	5,5	6,3	7,7	4,1	11,1
Total	100	100	100	100	100

Les déchets dangereux sont constitués essentiellement des déchets hospitaliers, des déchets ménagers contaminés par les produits toxiques ou par des pansements de soins.

Jusqu'en 2006, les déchets hospitaliers étaient toujours répertoriés parmi les déchets entrant sur le site de Nkolfoulou et stockés sans aucun traitement préalable (Zahrani ., 2006).

I.5.6. Les lixiviats sortant du site

Jusqu'en 2006 le CSD de Nkolfooulou n'était pas équipé d'un système de drainage des lixiviats. Leur écoulement suite à la pression provoqué par l'augmentation des déchets enfouis au travers des chemins préférentiels atteignait alors les fosses qui ceinturent les casiers et les bassins de rétention. **Zahrani** en **2006** a effectué la caractérisation de trois échantillons de lixiviats dont l'un dénommé E1 provenait d'un puits creusé à l'entrée du bassin de collecte de cette période, E2 provenant de la sortie et enfin E3 provenant d'un puits (creusé dans le casier de collecte 2004 – 2006). Les résultats consignés dans le tableau 4 ont été obtenus.

Tableau 2: Analyse des lixiviats de Nkolfooulou (Zahrani., 2006)

Classe	Paramètres	E1	E2	E3
Indicateurs	T (°C)	31	30.5	30
Globaux	Ph	8	8.9	7.5
Charge organique	DBO₅	420	500	700
(mg/L)	DCO	722	1124	2245
Carbone	CT	1340	1154	1699
Anions (mg/L)	F⁻	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
	Cl⁻	1313	1393	1644
	NO₂⁻	111	25.4	13.6
		238	177	54.8
	Br⁻	< 0,005	< 0,005	< 0,005
		436	72.1	24.8
	PO₄³⁻	7.93	8.61	14.7
Métaux lourds	Cd	<0.005	<0.005	<0.005
(Mg/L)	Cr	0.151	0.133	0.12
	Cu	0.108	0.010	0.007
	Fe	3.12	1.37	10.3
	Hg	0.011	<0.002	<0.002
	Mn	0.146	0.104	0.435
	Ni	0.163	0.213	0.396
	Pb	0.019	<0.003	0.059

I-6. Les différentes méthodes traitements des lixiviats

I-6.1. Les méthodes biologiques

La biodégradation des composés organiques est effectuée par le biais de micro-organismes pour donner du dioxyde de carbone et des boues dans les conditions aérobies, et du biogaz (un mélange composé principalement de CO₂ et CH₄) dans les conditions anaérobies (**Lema et al., 1988**). Les traitements biologiques se sont révélés très efficaces pour éliminer les matières organiques et azotées des jeunes lixiviats lorsque le DBO/DCO a une valeur élevée (>0,5). Avec le temps, la présence importante de composés réfractaires (principalement des acides humiques et fulviques) tend à limiter l'efficacité du processus.

I-6.1.1. Traitement aérobie

Les traitements biologiques aérobies font appel aux micro-organismes naturellement présents dans le milieu naturel pour dégrader les polluants présents. L'apport d'oxygène peut être naturel (le vent ou système de cascade) dans les petites installations de lagunage ou artificiel (turbine ou diffusion de microbulles) et dans les stations d'épuration de type "boues activées" (**Souhaila., 2012**).

I-6.1.2. Traitement anaérobies

Contrairement au traitement aérobie, la digestion anaérobie consomme peu d'énergie et produit très peu de matières solides.

En outre, il est possible d'utiliser le CH₄ produit pour réchauffer le digesteur qui travaille habituellement à 35 °C. Le principal inconvénient de ce procédé est sa sensibilité aux substances toxiques (**Sung et al., 1997**).

I-6.2. Les méthodes physico-chimiques

I-6.2.1. Flottation

Pendant de nombreuses années, la flottation a été largement utilisée, elle est basée sur l'élimination des colloïdes, des ions, des macromolécules, des micro-organismes et des fibres (**Rubio et al., 2002**).

Cependant, jusqu'à ce jour, très peu d'études ont été consacrées à l'application de la flottation pour le traitement des lixiviats. Récemment, **Zouboulis et al** en **2003** ont étudié l'utilisation d'une colonne de flottation comme une étape de post-traitement pour éliminer l'acide humique résiduel (composés non biodégradables) des lixiviats de décharges. Sous les conditions optimales, près de 60% d'acide humique a été éliminé.

I-6.2.2. Coagulation-Floculation

La Coagulation-floculation peut être utilisée avec succès dans le traitement des vieux lixiviats (**Silva et al., 2004**). Elle est largement utilisée comme un prétraitement (**Amokrane et al., 1997**) avant l'osmose inverse ou avant les procédés biologiques ou encore comme la dernière étape de traitement afin d'éliminer la matière organique bio-récalcitrante. Le sulfate d'aluminium, le sulfate ferreux, le chlorure ferrique et le chloro-sulfate ferrique ont été couramment utilisés comme coagulants (**Ehrig ., 1984**). Cependant, **Zouboulis et al., 2003**) ont montré que les biofloculants sont plus efficaces que les floculants inorganiques. Ce procédé présente certains inconvénients comme la production d'une grande quantité de boue et la diminution de la concentration de l'aluminium ou du fer dans la phase liquide.

I-6.2.3. Précipitation chimique

Grâce à son efficacité, sa simplicité et les équipements peu coûteux utilisés, la précipitation chimique a été utilisée pour l'élimination des composés organiques bio-récalcitrants, de l'azote ammoniacal et des métaux lourds à partir des lixiviats (**Ozturk et al., 2003**).

I-6.2.4. L'adsorption

L'adsorption des polluants sur charbon actif, en colonne (**Lim et al., 2009**) ou sous forme de poudre (**Agha et al., 2007**), donne un bon taux d'abattement de la DCO par rapport aux méthodes chimiques et ce quelle que soit la concentration initiale de la solution en matière organique. **Rodriguez et al en 2004** ont étudié l'efficacité de différentes résines pour l'élimination de la matière organique bio-récalcitrante et ont montré que le charbon actif présente la plus forte capacité d'adsorption.

I-6.3. Méthodes membranaires

I-6.3.1. La nanofiltration

En raison de ses propriétés uniques entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse, la nano filtration a montré ses preuves dans l'élimination des composés organiques récalcitrants et des

métaux lourds provenant des lixiviats (**Linde et al., 1995**). Elle a été utilisée en combinaison avec des méthodes physiques et il s'est avéré que les résultats obtenus sont satisfaisants. En effet, le taux d'abattement de la DCO obtenu est de l'ordre de 70-80% (**Trebouet et al., 2001**)

I-6.3.2. L'osmose inverse

L'osmose inverse semble être l'une des méthodes les plus prometteuses dans le traitement des lixiviats. En effet, plusieurs études effectuées à la fois à l'échelle du laboratoire et à l'échelle industrielle ont montré l'efficacité de ce procédé dans l'élimination des contaminants présents dans les lixiviats (**Linde et al., 1995**). Les taux d'abattement de la DCO et des métaux lourds sont respectivement supérieurs à 98 et 99%.

I-7. Les filtres plantés de roseau.

I -7.1. généralité et définition

Les Filtres plantés de roseaux sont des étangs, des lagunes ou bassins naturelles ou artificielles remplis de matériaux filtrant ou non au-dessus desquels sont cultivés des plantes aquatiques. Cette technique de phyto-épuration continue d'être largement utilisée pour le traitement des eaux usées domestiques, des lixiviats des décharges urbaines ou des eaux usées industrielles à cause de leur rapport qualité/coût de traitement élevé comparé à toutes les techniques utilisées jusqu'à nos jours (**Zhang et al., 2010**).

I -7.2. Le principe de fonctionnement

Le traitement primaire de l'effluent peut être effectué au travers des microorganismes, sous un gradient sous surfacique et activé par le soleil. Tandis que le flux d'écoulement continu rencontre le système racinaire des plantes qui assimile le reste de la matière organique et les nutriments. Eventuellement, l'eau souterrain quitte la végétation et alimente la surface en écoulement libre pour un affinage.

I-8. Les mécanismes d'épuration et les critères de conception et dimensionnement des filtres plantés de roseau

Les processus et performances connus jusqu'à nos jours est le principe de la conception et du dimensionnement des filtres plantés pour le traitement des lixiviats. Cependant, à cause de

la complexité des lixiviats, d'autres facteurs doivent être pris en compte. Les facteurs à considérer en plus de la réduction du SST, DBO/DCO, et nutriment sont les suivants :

- Très faibles débits qui interagissent abondamment avec la pluviométrie et l'évapotranspiration
- La survie de la végétation du marais
- Très grande quantité d'ammoniac à enlever
- Réduction des hydrocarbures volatiles
- Réduction des éléments traces toxiques tels que les PCBs, etc.)
- Elimination des quantités considérable de fer
- Elimination et stockage des traces de métaux
- Sensibilité et protection de l'eau de réception.

I-8.1. Les mécanismes d'épuration

I-8.1.1. L'élimination de la DBO / DCO et des MES

La dégradation de la matière organique favorise l'élimination de la DBO, DCO et MES dans les eaux usées. Il a été démontré que de grande quantité de matières organiques était éliminée sur les FPR à écoulement sous surfacique comparé à l'écoulement surfacique (Vymazal et al., 2006).

Dans ce processus ,les acteurs que sont les plantes aquatiques réalisent la photosynthèse en présence du soleil pour produire de l'oxygène qui sera par la suite transféré aux bactéries présentes sur le système racinaire de la plante qui l'utilisera à son tour pour dégrader les matières organiques présentes dans l'effluent. Les équations 1 et 2 illustrent parfaitement ce mécanisme

(1)

(2)

I-8.1.2. L'élimination de grande quantité d'azote ammoniacal

Nous avons l'azote sous forme organique et sous forme minérale dans les eaux usées. L'acide aminé, l'urée, l'acide urique, la purine et pyrimidine sont les différentes formes d'azote organique. L'ion ammonium (NH_4^+), nitrite (NO_2^-), Nitrate (NO_3^-), l'oxyde nitreux (N_2O) et enfin le di azote dissous (N_2) sont les formes inorganiques d'azote. L'azote gazeux est composé du di azote, l'oxyde nitreux (N_2O), l'oxyde nitrique (NO_2) et l'ammoniaque libre

Les voies classiques et les voies découvertes récemment sont les voies pour la transformation et l'élimination de l'azote dans les filtres plantés de roseaux à écoulement sous surfacique. **Les voies classiques** sont les voies biologiques (ammonification, nitrification, dénitrification, la prise par les plantes, l'assimilation de la biomasse, la réduction dissimulatrice du nitrate) et physicochimiques (volatilisation et adsorption). Les voies nouvelles, récemment découvertes, dépendent des métabolismes microbiologiques la partielle nitrification-dénitrification.

Les voies classiques d'élimination

La première étape de la transformation de l'azote en écoulement sous surfacique est *l'ammonification*. C'est un procédé biochimique complexe de libération d'énergie et de production d'ammoniac par **désamination** selon l'équation suivante

(3)

Dans les FPR, ce procédé diminue avec la profondeur et augmente avec la température. Le pH idéal se situe entre 6,5 et 8,5.

La seconde étape de l'élimination de l'azote si l'eau usée contient majoritairement de l'azote est *la nitrification*. Si l'azote ammoniacal (N-NH_4) prédomine, la nitrification devient la première étape. Le procédé se déroule en deux phases où en présence d'oxygène, $\text{NH}_4\text{-N}$ est d'abord converti en azote nitrique (N-NO_2) par les bactéries chimiolithotrophes strictes (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus* et *nitrosospira*), ensuite en azote nitrate par les bactéries chimiolithotrophes facultatives (*Nitrospira* et *Nitrobacter*).

Les équations prenant en compte l'azote assimilé par les bactéries pour produire la biomasse bactérienne sont les suivantes :

Première nitrification

(4)

Seconde nitrification

(5)

Equation bilan

(6)

La Dénitrification : le mécanisme majeur de l'élimination de l'azote total sur le FPR est la **dénitrification** (Chung et al., 2008 ; Saeed et Sun, 2012). La nitrification est assurée par les bactéries ; dans ce processus l'oxyde d'azote produit précédemment au cours du processus sert comme terminal accepteur d'électron lors de la respiration par le transport d'électron. La matière organique ici jouant le rôle de donneur. (Vymazal, 1995). La dénitrification est l'œuvre de bactéries facultatives telles que *Bacillus*, *Enterobacter*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Spirillum*.

(7)

(8)

Assimilation par la biomasse. L'incorporation du N-NH₄ dans la biomasse hétérotrophe afin de combler leur besoins en nutriments est la caractéristique principale de **l'assimilation par la biomasse.**

Réduction dissimulatrice du nitrate : c'est la réduction de N-NO₂ et de N-NO₃ en N-NH₄. On l'observe généralement dans un environnement limité en nitrate et riche en carbone

La prise par les plantes Les plantes ont une contribution de l'ordre de 40% du total entrant sur un FPR dans le processus d'élimination de l'azote. (Bialowiec et al., 2011)

Volatilisation de l'ammoniaque : c'est un procédé physique au cours duquel l'ammoniac s'évapore par transfert de masse de la surface de l'eau vers l'atmosphère. Ce phénomène est insignifiant dans les FPR à écoulement sous surfacique.

Adsorption : Le milieu filtrant poreux ou par échange cationique entre les composés du milieu et les ions NH_4^+ dans l'eau ; sont des phénomènes qui gouvernent l'adsorption. L'orientation de l'élimination vers une adsorption en milieu poreux n'est pas fréquemment observée dans les FPR étant donnée la faible capacité d'absorption du sable et du gravier couramment utilisé (Saeed and sun, 2012)

I-8.1.3. Elimination des quantités considérable de fer

Le fer existe en forme réduit (ferreux) dans une condition de vie sans oxygène (**anaérobiose**) dans un bac. Le fer se converti en sa forme ferrique insoluble lorsque la surface des lixiviats dans un système de traitement devient oxydant. Les précipités sont oxyhydroxydes qui sont des masses gélatineuses capables de boucher tout système à écoulement vertical. Ainsi, l'élimination initiale du fer est indispensable avant tout traitement à écoulement vertical. L'aération et la décantation sont les deux étapes communément utilisées pour l'élimination du fer. Les systèmes passifs tels que les cascades sont utilisé pour l'aération et les bacs peuvent être effectifs pour la sédimentation et la co-précipitation.

I-8.1.4. Réduction des hydrocarbures volatiles

Le control du nombre élevé de chaque composé organique volatile sujet à une régulation est l'application la plus prometteuse du traitement des lixiviats. Les zones d'eau peu profondes donnent l'opportunité d'un piégeage des COV par l'air. Cependant l'efficacité n'est pas aussi élevée que pour les équipements mécaniques. Mais la différence est compensée par des temps de séjour élevés. Les systèmes à écoulement de surface sont plus indiqués pour l'élimination des COV.

I-8.1.5 Réduction des éléments traces toxiques

Les HAP sont présent dans les lixiviats et sont généralement adsorbé sur le lit des particules et dégradés par les microorganismes présents. Le fer est l'élément fréquent des lixiviats de décharge

I-8.1.6. Elimination et stockage des traces de métaux

L'échange de cations sur les sédiments du FPR précipitant comme sulfites et autres sels insolubles ou tout simplement absorbé par la plante permet d'extraire les traces métalliques. Les sédiments anaérobiques apportent la réduction du sulfate en sulfite et facilitent la précipitation chimique. Les meilleurs choix sont les filtres à écoulement vertical de tourbe à cause de leur large capacité de stockage et filtre à écoulement de surface parce qu'il renouvelle le milieu de stockage en créant une nouvelle tourbe chaque année. Ici, l'usage

des filtres à écoulement souterrain en sable et/ou gravier n'est pas un choix judicieux à cause de l'adsorption limitée et l'incapacité de former de nouveaux sédiments de stockage sans boucher le lit.



CHAPITRE II : PARTIE EXPERIMENTALE

II. MATÉRIELS, ECHANTILLONNAGE ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

II.1. Produits chimiques utilisés et matériels

II.1.1. Produits chimiques

Les produits chimiques utilisés au cours de cette étude (**Tableau 3**) sont de qualités analytiques. Ils ont été utilisés sans purification préalable. Toutes les solutions ont été préparées avec de l'eau distillée à une température de 25 °C.

Tableau 3: Produits chimiques utilisés dans cette étude.

Poudre du Réactif A
Poudre de Réactif B
Réactif C
potassium chlorure KCl : 1 M
Molybdovanadate
Eau distillée
sodium Hydroxyde NaOH 98% (Merck) 1.54 N
Potassium persulfate

II.1.2. Verrerie et appareillage

Nous avons utilisés comme verrerie :

- ✓ Les erlenmeyers de 250 mL
- ✓ Les béchers de 100 mL
- ✓ Des micros pipettes réglables de 0 à 1 mL
- ✓ Une pissette de 100 mL
- ✓ Une fiole jaugée de 1 L
- ✓ Un entonnoir en verre plastique
- ✓ Un creuset en verre
- ✓ Un LCK 314

- ✓ Des récipients en PET spéciaux
- ✓ Des filtres de diamètre des pores de 0,45 μm

Les appareils utilisés dans ce travail sont notamment :

- ✓ Un pH-mètre électronique de type ATC de marque ROHS avec batterie intégré (voir annexe 2)
- ✓ Un conductimètre électronique de marque HANNA (voir annexe 2)
- ✓ Un spectrophotomètre de marque HACH ;DR 3900 (voir annexe 2)
- ✓ Une balance électronique de marque AND GF-200 avec les caractéristiques suivantes : Max = 210 g ; Min = 0,02 g ; e = 0,001 g
U = 12 V ; I = 0,3 A
- ✓ Un dessiccateur
- ✓ Un digesteur (voir annexe 2)
- ✓ Dispositif de filtration (voir annexe 2)

II.2. Traitement de lixiviats par le système de filtres plantés de roseaux

II.2.1.Types de filtres plantés de roseaux

Dans le traitement des lixiviats des décharges sur filtres plantés de roseaux ; nous avons différents types de filtres. Dans le cas présent, nous distinguons principalement deux types d'écoulement à savoir les systèmes à écoulement libre de surface ou filtres plantés à écoulement surfacique(**SES**), système où l'eau est maintenue entre 10 et 30 cm du dessus du lit filtrant et les systèmes à écoulement sous surfacique (**SESS**). Il a été rapporté un troisième système hybride des deux premiers incorporant l'écoulement libre de surface et l'écoulement sous surfacique (**Zhang et al., 2010**). Celui-ci conviendrait mieux pour les eaux contenant une large gamme de polluants tels que les lixiviats de décharge.

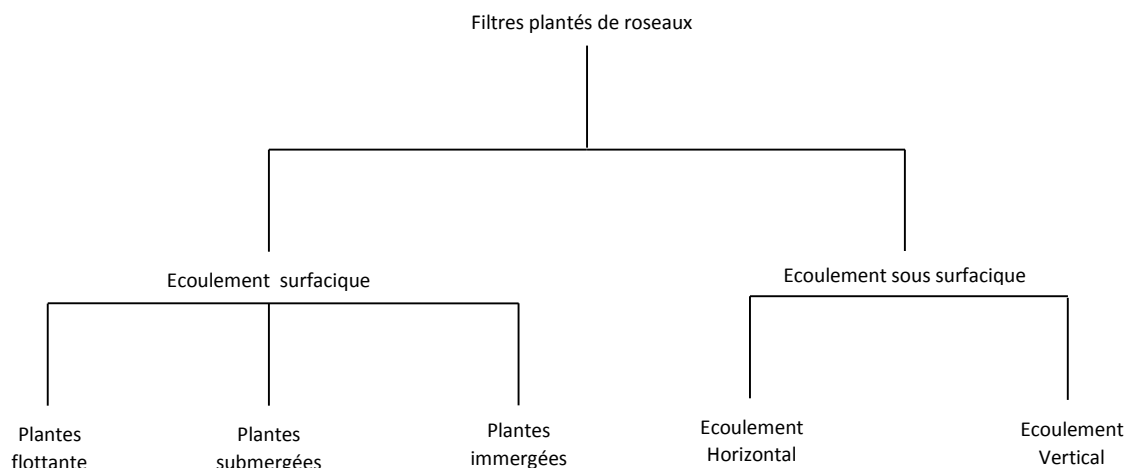


Figure 4: Les différents types de filtres plantés de roseaux

II.2.1.1 Les filtres plantés à écoulement sous surfacique (SESS)

Les bassins ou canaux comportant une couche de barrière pour prévenir l'infiltration souterraine et d'un lit poreux composé de pierres, graviers, et différents sols supportant la croissance des plantes émergentes sont les constituants des **SESS**. Au travers d'un dimensionnement propre à la structure, le niveau de l'eau est maintenu en dessous de la surface du lit filtrant. Le flux d'eau polluée s'écoule horizontalement (FH) ou verticalement (FV) au travers du milieu filtrant et est purifié au cours de son contact avec la surface du milieu et le réseau racinaire de la végétation.

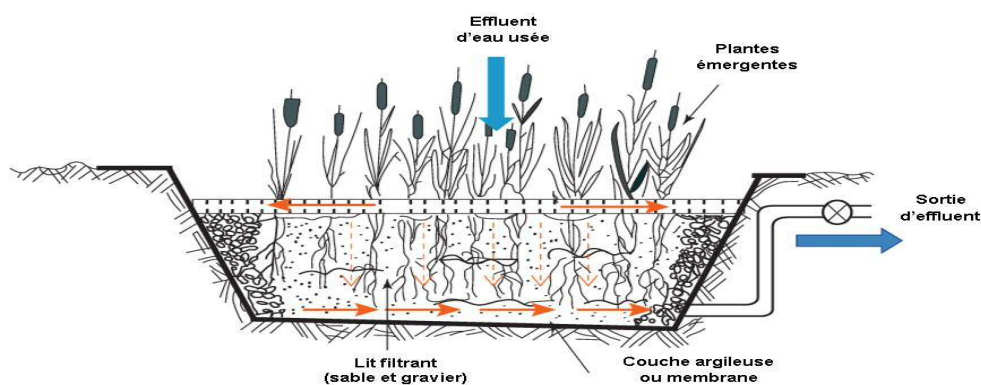


Figure 5: Diagramme schématique d'un FPR en SESS en écoulement vertical

II.2.1.2 Les filtres plantés à écoulement surfacique (SES)

Les bassins ou canaux recouverts d'une couche barrière pour prévenir l'infiltration de l'eau dans les couches sensibles souterraines et d'un lit qui supportera la croissance des

plantes sont les constituants de SES. Ces réservoirs sont équipés de dispositifs à l'entrée et à la sortie pour faciliter la distribution et la collecte de l'eau usée, le contrôle du niveau d'eau, et le maintien de la charge hydraulique.

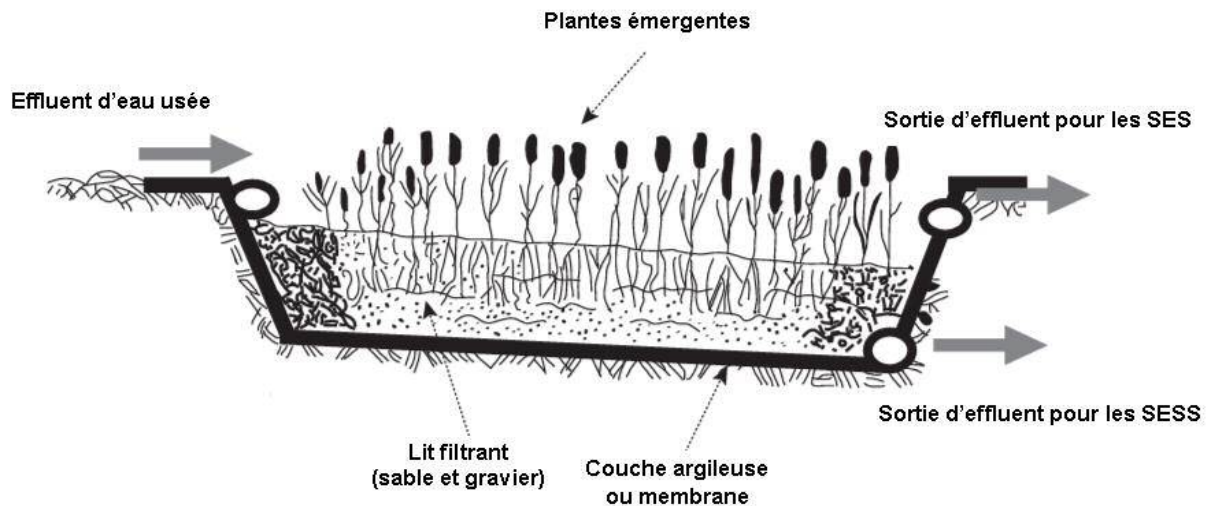


Figure 6: Diagramme schématique d'un FPR à écoulement horizontal

II.2.1.3 Les FPR à écoulement mixte

Certaines catégories d'effluent telles que les lixivats de décharges contiennent une grande quantité de polluants qui ne peuvent pas être éliminés par un seul type de système, d'où est née l'idée de la conception des filtres plantés à écoulement mixte. Cette idée a été mentionnée par **Kadlec et Wallace (2009)** comme appropriée pour le traitement des lixivats de décharge.

II.2.2. Système de filtres plantés de roseaux

Le système de traitement est constitué de deux filtres et d'un mélangeur qui sert d'entrée du filtre 1. Ces deux filtres ont chacun un volume de 1 m^3 et une surface de 1 m^2

- Le filtre 1 est constitué des sables grossiers, des graviers et des plantes,
- Le filtre 2 est constitué des sables fins, des graviers et des plantes. (voir annexe 2)

La plante utilisée dans le système est *Echinochloa pyramidalis* qui a été déjà utilisée pour assécher les boues fécales provenant des latrines (**Kegne., 2011**)

Le système utilisé est à écoulement sous-surface (SESS). Vu la viscosité des lixivats du bassin 1, une dilution est effectuée au niveau du mélangeur pour diminuer la viscosité afin de permettre l'absorption des polluants par le système racinaire. Le dispositif de traitement est consigné dans la figure 7.



Figure 7: Système de filtres plantés de roseaux.

II.3. Méthodologie et points d'échantillonnage

II.3.1 Méthodologie

Pour parvenir à réduire à la normale le taux de la charge polluante des lixiviats et les eaux environnantes de la décharge, nous allons effectuer un suivi d'abattement de la DCO du Phosphore total et d'Azote total sur une période d'au moins 1 mois ; tout d'abord en effectuant la caractérisation des lixiviats et des eaux environnantes de la décharge. En passant par :

- ❖ Des prélèvements des échantillons de lixiviats sortant de la décharge et du système de filtres plantés.
- ❖ Des prélèvements des eaux environnantes de la décharge
- ❖ L'analyse de ces échantillons pour déterminer :
 - ✚ La matière organique en effectuant une demande chimique en oxygène (DCO)
 - ✚ Déterminer l'azote et le phosphore total présent dans les échantillons par digestion acide suivi de la mesure de la concentration au spectrophotomètre ;
 - ✚ Déterminer la matière minérale à l'aide d'un conductimètre ;

II.3.1 points d'échantillonnage

Les travaux et les prélèvements des échantillons ont été effectués dans la nature (dans les environs de la décharge), mais aussi dans la décharge ; et enfin sur le système de traitement mis en place.

- ❖ Dans la nature, les échantillons d'eaux ont été prélevés en aval du fleuve, en amont, dans un ruisseau non loin de la décharge et au niveau du point de rencontre entre les lixiviats et du fleuve. (**voir annexe 2**)
- ❖ Dans la décharge, les lixiviats ont été prélevés dans les bassins de décantation (bassin 1, et bassin 2) mais aussi dans les casiers de pompages des lixiviats (zone 3A, zones 3E, zones 3C).
- ❖ Au niveau du système de traitement (entrée filtre 1 : SF1, sortie filtre 1: SF1, sortie Filtre 2 : SF2). Les points d'échantillonnage sont représentés dans la **figure 8**

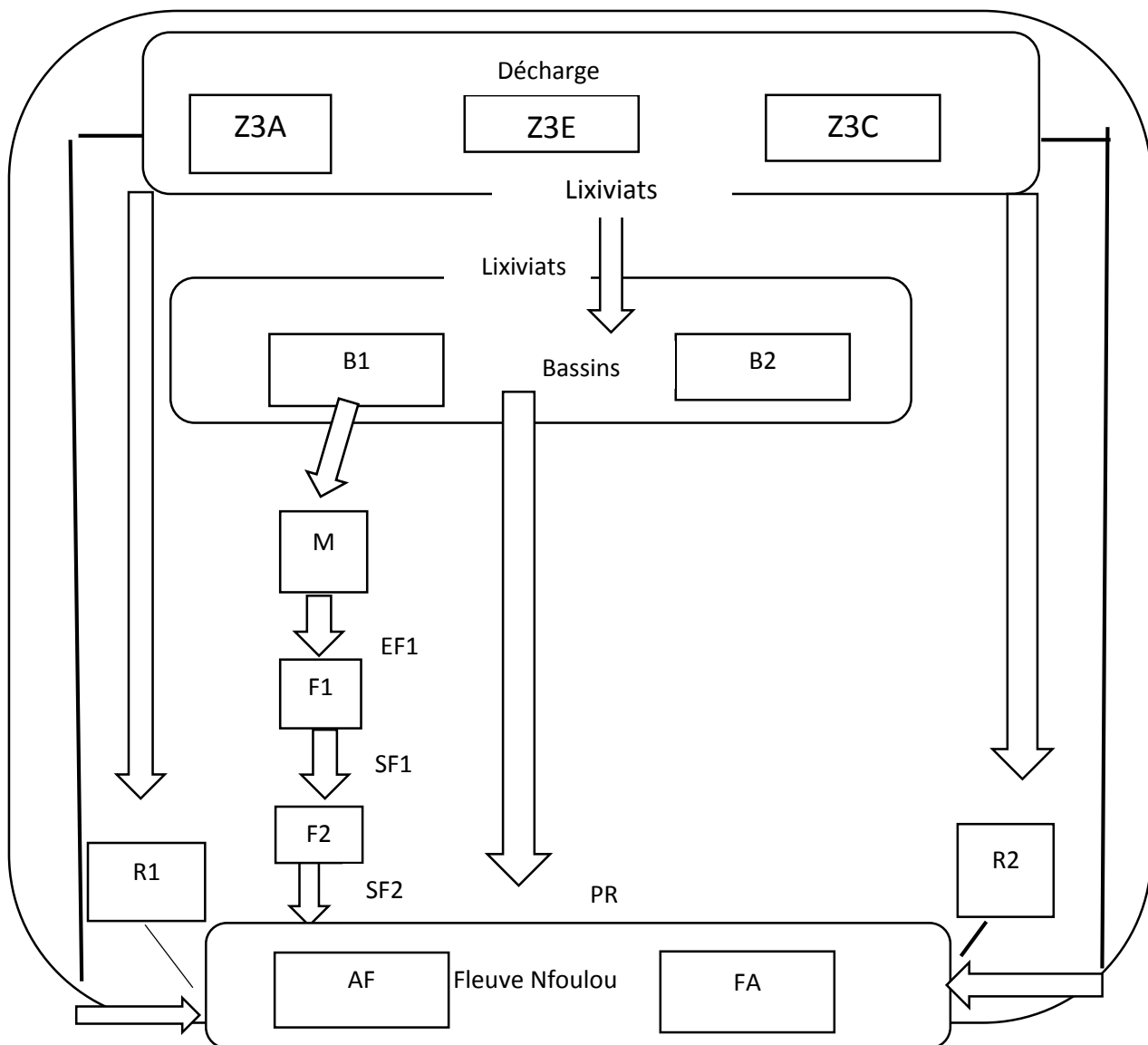


Figure 8: Points d'échantillonnage et écoulements des Lixiviats vers l'environnement

M : Mélangeur ; EF1 : Entrée Filtre1 ; SF1 : Sortie Filtre1 ; SF2 : Sortie Filtre2

AF : Amont du Fleuve ; PR : Point de rencontre ; FA : Fleuve Aval ;

Z3A: Zone 3A ; Z3B : Zone 3E ; Z3C : Zone 3C

B1 : Bassin 1 ; B2 : Bassin 2 ; R1: Ruisseau Amont ; R2 : Ruisseau Aval

L'analyse de ses échantillons a été effectuée sur des eaux filtrées et sur des eaux non filtrées.

II.4. Techniques d'échantillonnage et d'analyse

Trois types d'échantillons ont été collectés premièrement dans les rivières et sur les lixiviats (dans les casiers et sur les bassins) et enfin sur le système de traitement. Les prélèvements ont été faits en début de la journée ensoleillée et pendant la longue saison pluvieuse en Mars et en Avril 2016.

L'échantillonnage des lixiviats a été effectué mensuellement durant l'année 2016, au niveau de cinq points représentatifs du site de la décharge (**Figure 3**). Pour connaître si les lixiviats quittent la décharge ou pas, des prélèvements d'eau ont été effectués durant la même période sur les cours d'eaux environnants la décharge qui sont : Le fleuve Nfoulou, un ruisseau qui se jette dans l'amont du fleuve Nfoulou nommé ici ruisseau 1 en amont et un second ruisseau qui se jette dans l'aval du fleuve Nfoulou nommé ruisseau aval. L'aval et l'amont sont pris par rapport à la position du bassin de collecte des lixiviats où nous avons un point de déversement des lixiviats vers le fleuve Nfoulou. Ce point a été nommé point de rencontre des lixiviats et le fleuve. Celle-ci est installée sur la partie Ouest s'écoulant juste à la périphérie de la décharge.

❖ Préparations des échantillons (voir annexe 2)

Conservation et entreposage

Conserver à froid et analyser dans les sept jours qui suivent l'échantillonnage. Les mesures de conservations ne sont pas nécessaires pour les échantillons composés uniquement d'eaux souterraines. Conserver au frigo et analyser dans les 48 h.

❖ Échantillonnage : utiliser les bouteilles en verres ou des récipients en PET spéciaux.

Pour éviter l'évolution des échantillons, le pH et la conductivité ont été déterminés directement sur le site. Sur les échantillons qui ont été ensuite acheminés au laboratoire, nous avons préalablement acidifiés nos échantillons à l'acide sulfurique en vue de déterminer la DCO, l'azote et le phosphore présent dans les lixiviats. La teneur en DCO, en azote et en phosphore ont été déterminée par digestion acide suivi d'une mesure de la concentration au spectrophotomètre.

En dehors du pH, et de la conductivité, le reste des analyses a été effectué au Laboratoire de Biotechnologie Végétales Environnementaux du Département de Biologie de l'Université de Yaoundé 1.

❖ Détermination du pH

La détermination du pH des échantillons d'eaux et de lixiviats a été effectuée directement sur le site à l'aide d'un pH-mètre électronique préalablement calibré aux solutions tampons. Après prélèvement, nous avons immergé la partie dédiée à cet effet de l'électrode de notre pH-mètre dans le bocal contenant l'échantillon à analyser après stabilisation, la lecture de la valeur numérique du pH de la solution a été faite puis noté à la fin de la manipulation, le pH-mètre a été rincé à l'eau distillée.

❖ Détermination de la conductivité

La détermination de la conductivité des échantillons d'eaux et de lixiviats a été effectuée directement sur le site à l'aide d'un conductimètre électronique au cours duquel, sur les différents échantillons, nous avons immergé notre conductimètre dans l'échantillon à analyser après stabilisation, la lecture de la valeur numérique de la conductivité des échantillons d'eaux et de lixiviats a été faite puis noté à la fin de la manipulation, le conductimètre a été rincé à l'eau distillée.

II.5. Préparation des échantillons avant analyses et méthodes d'analyses (voir annexe 2)

❖ Détermination de l'azote total

Protocole

- Introduire à la micropipette 0,5 mL d'échantillon dans le tube d'hydroxyde d'Azote et secouer
- ouvrir le tube et ajouter le contenu de l'azote total, la poudre Pilow (De Réactif de Persulfate d'Azote)
- Fermer le tube et secouer rigoureusement pendant 30 secondes
- placez le tube dans le digesteur à 100 °C pendant exactement 30 minutes
- laisser refroidir le contenu du tube à la température ambiante
- ajoutez la teneur d'un réactif A et secouez le tube
- la période de 3 minutes de réaction commence
- ajoutez la teneur d'un réactif B dé saupoudrer et secouez les fioles
- la période de 2 minutes de réaction commence
- ajouter 2 mL de l'échantillon digéré dans le réactif C
- retourner le tube 10 fois
- mesurez la concentration avec le spectrophotomètre à 394 nm

❖ Détermination du phosphore total

• Protocole

- Introduire 5 mL de l'échantillon dans le tube du phosphore total
- Ajouter le contenu de la poudre de persulfate de potassium dans chaque tube
- Agiter pour dissoudre la poudre
- Laisser dans le digesteur pendant 30 minutes à 150 °C
- Laisser refroidir pendant à température ambiante
- Ajouter 2 mL du sodium hydroxyde 1.54 N
- Ajouter 0.5 mL du réactif de Molybdovanadate à l'aide d'un compte-goutte de polyéthylène
- Renverser pour mélanger
- Laisser réagir pendant 7 minutes
- Mesurer la concentration avec le spectrophotomètre à 540 nm entre 7 et 9 minutes

❖ Demande chimique en oxygène (DCO)

• Méthode de mesure :

- Introduire 2 mL d'échantillon dans un tube de DCO de la gamme de lecture de 0 à 1500 mg/L
- Retourner le tube à 10 reprises
- Laisser dans un digesteur pendant 120 minutes à 148°C
- Sortir les tubes et laisser refroidir dans un port tube pendant 30 minutes
- Lire la concentration au spectrophotomètre à 600 nm
- **Expression du résultat** : en tant que carbone, mg/L de carbone.



CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. LA CHARGE POLLUANTE DES RIVIÈRES DU SITE DE NKOLFOULOU

L'ensemble des analyses et les paramètres étudiés ont été faites sur des échantillons d'eaux non filtrées. Les résultats de ces analyses et les différents paramètres ont été regroupés dans le **tableau 4**.

Tableau 4: La Charge polluante des rivières du site de Nkolfoulou prélevés en fin Mars 2016

Échantillon	pH	Conductivité (µS/cm)	DCO (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)
Amont du fleuve Nfoulou (AF)	7,3	180	66	9	0
Ruisseau Amont (R1)	7,2	260	77	4	0
Point de rencontre lixiviât-fleuve (PR)	7,4	196	116	13	0
Aval du fleuve Nfoulou (FA)	7,4	178	4	10	0
Ruisseau Aval (R2)	7,2	239	247	19	0
Valeurs moyennes	7,3	210,6	102	11	0

III.1.1. L'effet de la charge polluante sur la conductivité.

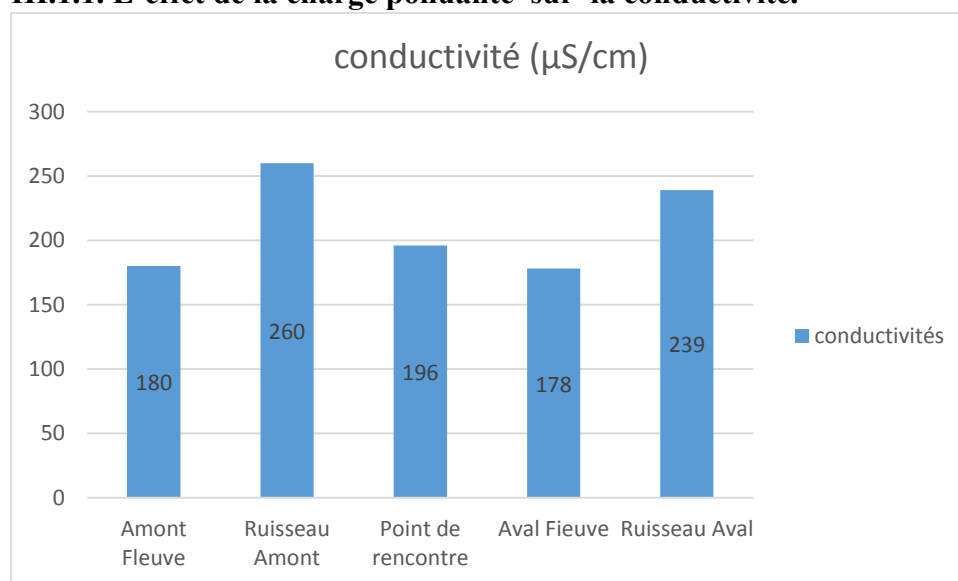


Figure 9: Conductivité des eaux environnantes de la décharge.

Le tableau 4 et la figure 9 montrent que les valeurs de la conductivité électrique enregistrées au cours du suivi des mobilités sont plus élevées, au niveau des eaux du ruisseau par rapport aux eaux du fleuve allant de 178 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'eau située en aval du fleuve à 239 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'eau du ruisseau en aval, 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'eau située en amont du fleuve, est de 196 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les eaux situées sur le point de rencontre des lixiviats et du fleuve et de 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'eau du ruisseau en amont située à proximité de la décharge avec une valeur moyenne de 210.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valeur supérieure à la norme Française de potabilité de l'eau qui est de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceci est dû à la contamination des eaux par les lixiviats de la décharge. Ces résultats ont aussi été obtenus par **Ekani en 2015** qui montraient également que la conductivité était plus élevée au niveau des eaux du ruisseau par rapport aux eaux du fleuve.

III.1.2. L'effet de la charge polluante sur la DCO des eaux environnantes de la décharge

La demande chimique en oxygène (DCO) mesure la quantité d'oxygène qui serait nécessaire pour oxyder les substances organiques dissoutes ou en suspensions. Lorsque des matières organiques sont présentes dans l'eau, leur oxydation entraîne une chute de la quantité d'oxygène dissous, ce qui peut nuire, en cas d'excès, à la survie de la faune et la flore.

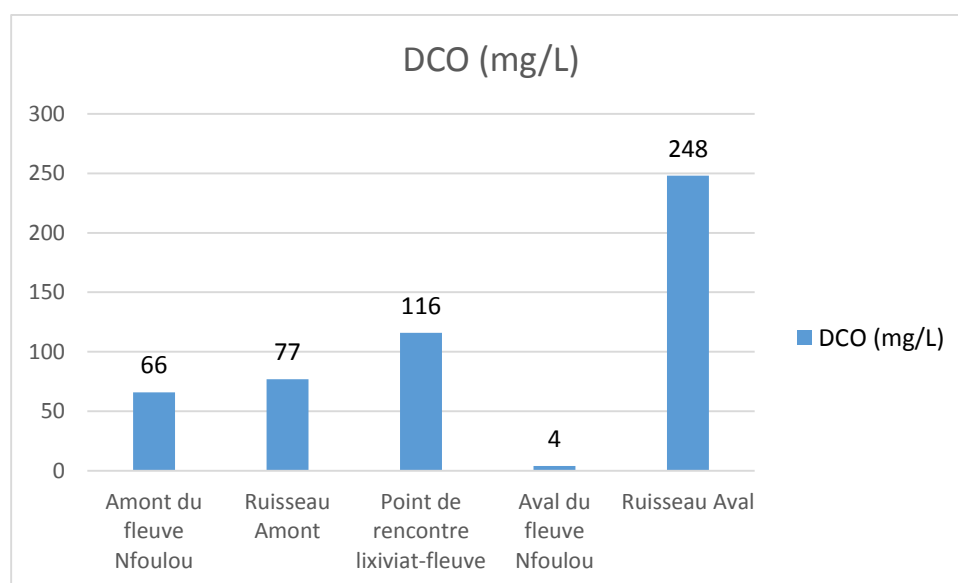


Figure 10: DCO des eaux non filtrées.

Le tableau 4 et la figure 10 montrent que la DCO est importante au niveau du point de rencontre entre lixiviats- fleuve correspondant à une valeur de 116 mg/L. Cependant, elle est encore plus élevée au niveau du ruisseau situé en aval des bassins avec une valeur de 248

mg/L. La valeur moyenne de la DCO se trouvant sur l'eau du fleuve Nfoulou est de 102 mg/L. Valeur supérieure à la norme de potabilité de l'eau par l'OMS qui est de 13,80 mg/L. Ces résultats entrent en conformité avec ceux qu'a obtenus Ekani en 2015.

Ces résultats proviennent du fait que la matière organique présente dans les lixiviats qui sont déversés dans le fleuve tous les sept jours après traitement dans les bassins de décantation est considérée comme une source de dégradation des déchets présents dans la décharge. Cette matière organique subit de multiples transformations au cours des différentes étapes de dégradations. Les rejets agricoles, urbains et industriels issus de la décharge sont source de pollution par la matière organique. La DCO permet de déterminer la quantité de matière oxydable présente dans les lixiviats et permet aussi d'estimer la matière organique. Cependant, le carbone organique dissous s'avère être le paramètre le plus adapté pour évaluer la matière organique contenue dans le lixiviat.

III.1.3. L'effet de la charge polluante sur l'azote et le phosphore

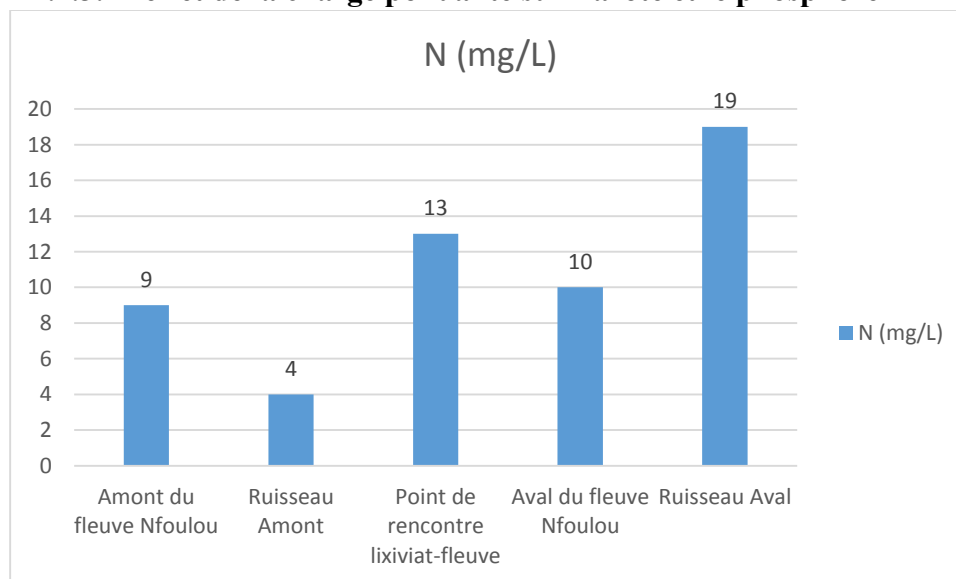


Figure 11: Évolution de l'azote

Pour le phosphore, le tableau 4 montre l'absence du phosphore dans les eaux environnantes de la décharge ; ceci est dû à sa dégradation par les micros organismes.

Le tableau 4 et la figure 11 montrent que la teneur en azote présente des fortes concentrations dans les eaux provenant du ruisseau qui se jette dans l'aval du fleuve. Les valeurs trouvées sont supérieures à celles trouvées à l'amont du fleuve (4 mg/L) avec une valeur moyenne de 11 mg/L qui est également supérieure à la norme de potabilité des eaux en

France qui doit être inférieur à 1 mg/L (voir annexe) . Ceci peut être attribué à la vitesse et la durée d'infiltration des lixiviats à travers le sous-sol et au phénomène de dilution des lixiviats dans les eaux de la nappe phréatique lors de la contamination. L'évolution de la teneur en azote montre une augmentation au niveau de l'aval du ruisseau suite à l'écoulement superficiel du lixiviats provenant de la zone C.

On constate que l'eau du ruisseau aval est la plus concentrée et le plus contaminée en azote et en DCO. Ce constat a aussi été fait par Ekani en 2015. Ceci est dû au fait qu'au moment de l'échantillonnage il a été constaté qu'il y avait une fissure laissant couler le lixiviat provenant de la zone C et qui circulait jusqu'au niveau de ce ruisseau. D'où la contamination.

III.1.4. L'effet de la charge polluante sur le pH

Le tableau 4 montre que le pH au niveau de l'amont du fleuve est de 7,3 et de 7,4 au niveau du point de rencontre des lixiviats et le fleuve avec une valeur moyenne de 7,3 donnant ainsi un pH presque neutre.

III.2. LA CHARGE POLLUANTE DES LIXIVIATS FILTRÉS DANS LES DIFFÉRENTES ZONES

L'analyse des échantillons et l'étude des différents paramètres ont été effectuées sur un mois. Pour mieux étudier l'état de la pollution, le prélèvement a été effectué le 22 Mars 2016 correspondant à la saison de pluie.

Tableau 5: La Charge polluante des lixiviats filtrés des différentes zones prélevée en fin Mars 2016

Date	Échantillons	pH	Conductivité (μ S/cm)	DCO (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)
22/03/2016						
	Zone 3A	8.0	19200	5250	788	295.8
	Zone 3C	8.2	7040	666	218	5.4
	Zone 3E	8.1	13820	2510	1396	79.8
	Bassin 1	7.4	7470	1750	102	13.9
	Bassin 2	9.8	6460	1032	58	18.7

III.2.1. Effet la charge polluante sur la DCO des lixiviats filtrés.

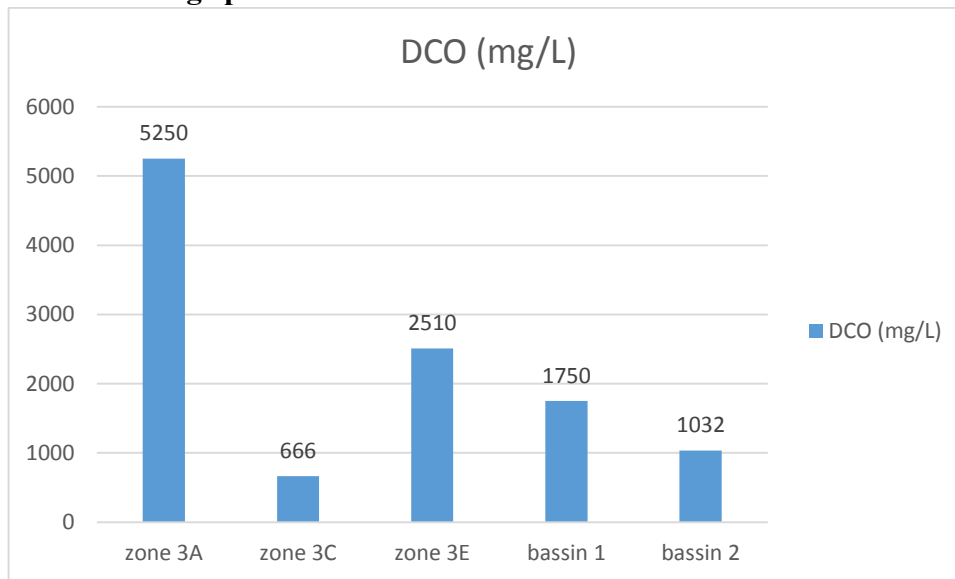


Figure 12: Évolution de la DCO des lixiviats filtrés du mois de Mars 2016

Il est à noter que la matière organique présente dans les lixiviats est considérée comme un bon indicateur de l'état de dégradation des déchets à cause des multiples transformations qu'elle subisse au cours des différentes étapes de dégradation. La demande chimique en oxygène permet de déterminer la quantité de matière oxydable présente dans les lixiviats et aussi d'estimer la matière organique.

De cette analyse, le tableau 5 et la figure 12 montrent que les lixiviats de cette décharge sont très concentrées en DCO atteignant la valeur de 5250 mg/L au niveau de la zone 3A, ceci est due au fait qu'elle est le lieu de pompage des lixiviats. Ces résultats montrent des valeurs qui sont plus élevées par rapport à celles trouvées en novembre 2014 (Ekani., 2015). Ceci est expliqué par le fait que la saison pluvieuse provoque une extraction importante des lixiviats dans le lieu de stockage des déchets à la décharge.

III.2.2. Effet de la charge polluante sur la conductivité des lixiviats filtrés.

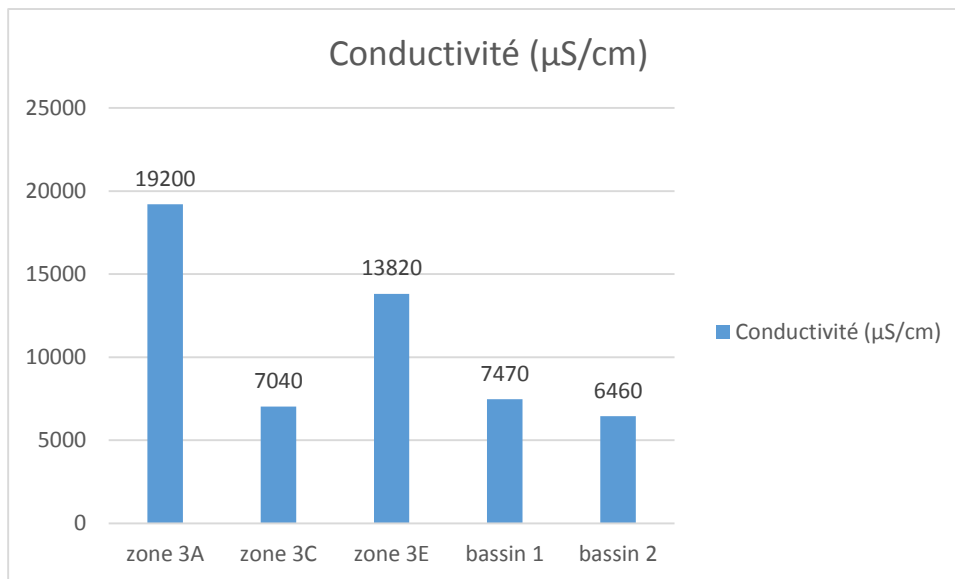


Figure 13: Évolution de la conductivité des lixiviats filtrés.

Le tableau 5 et la figure 13 montrent que la conductivité est très élevée pour les lixiviats de la zone 3A correspondant à la valeur de 19200 µS/cm. La mesure de la conductivité apporte une information globale sur la quantité d'espèce chargées qui sont présentes dans les différents échantillons. Ceci est dû à la forte minéralisation des lixiviats de cette décharge qui toujours en conformité avec les résultats **d'Ekani en 2015**. Ces valeurs sont supérieures aux normes Nationale et Internationale de rejet des eaux usées.

III.2.3. La charge polluante en azote dans les lixiviats filtrés

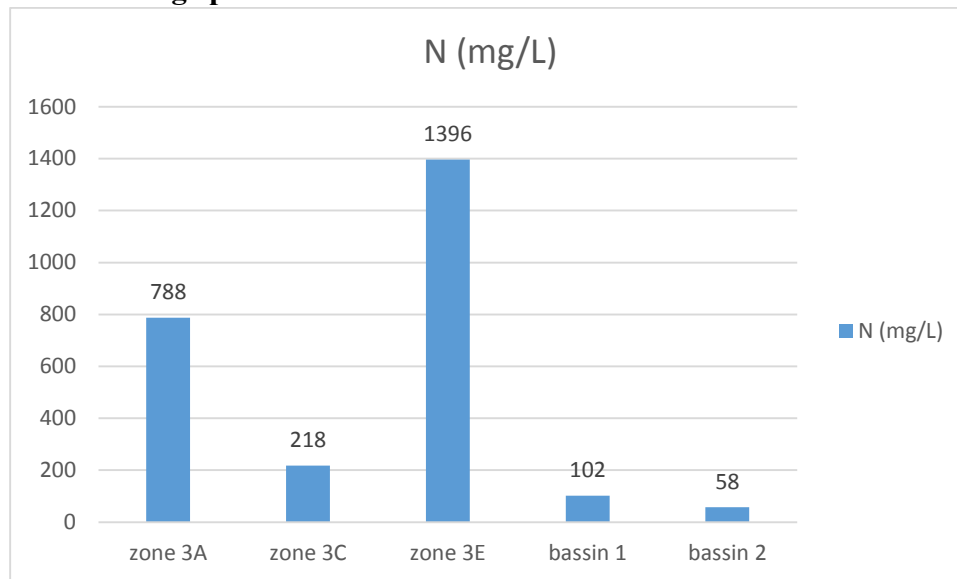


Figure 14:Évolution de l'azote des lixiviats filtrés

Le tableau 5 et la figure 14 montrent que la concentration en azote est très faible pour les lixiviats du bassin 2 avec une valeur de 58 mg/L ; et une forte concentration en azote pour les lixiviats de la zone 3E atteignant la valeur 1396 mg/L avec une valeur moyenne de 512,4 mg/L. ces résultats montrent la gravité des dangers que présente la décharge pour l'environnement. Il est à noter que, l'azote cause des problèmes d'anoxie des milieux aquatiques et peuvent entraîner une eutrophisation des écosystèmes.

Au regard de ses résultats, il ressort que la charge polluante est plus importante au niveau des zones par rapport aux bassins qui sont moins concentrés. Ces résultats ont été aussi obtenus par **Ekani en 2015**. Ceci peut s'expliquer par le fait que les lixiviats se trouvant dans les bassins ont subi un traitement préalable ce qui n'est pas le cas avec les lixiviats provenant des zones de pompages. Cependant, les valeurs de l'azote, du phosphore, de la DCO sont toujours plus élevées et supérieures aux normes de rejets des eaux usées.

III.2.4. L'effet des charges polluantes des lixiviats sur le pH

Le tableau 5 montre que les valeurs de pH des lixiviats varient entre 7,4 et 9,8 pour une valeur moyenne de 8,3. On note que ce pH est basique. Ceci est dû à la basicité des lixiviats. Des valeurs de pH faible (acide), augmentent les risques de présence des métaux lourds sous forme ionique plus toxique. Des pH basique augmentent les concentrations en ammoniac.

III.3. LA CHARGE POLLUANTE DES LIXIVIATS BRUTS

Tableau 6: La charge polluante des lixiviats bruts

Date	Échantillons	pH	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	DCO (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)
22/03/2016	Zone 3A	8.0	19200	7080	1012	338.8
	Zone 3C	8.2	7040	740	247	13
	Zone 3E	8.1	13820	3240	1428	76.6
	Bassin 1	7.4	7470	1750	110	49.2
	Bassin 2	9.8	6460	1234	72	10

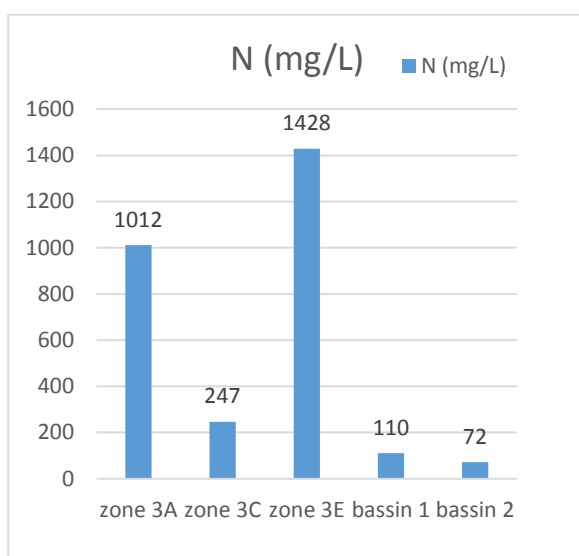


Figure 16: Azote des lixiviats bruts

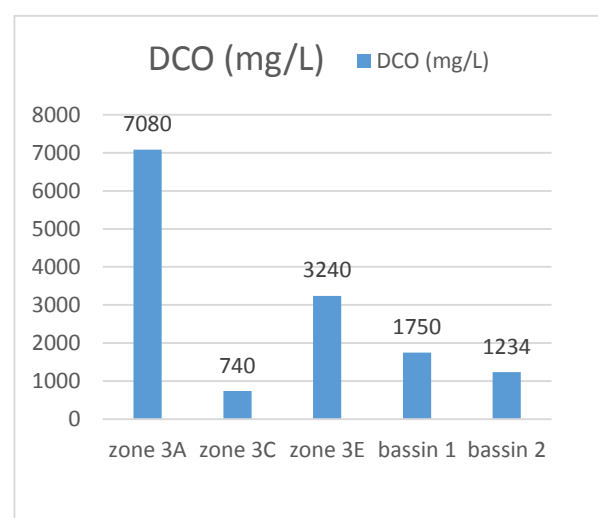


Figure 15: DCO des lixiviats brut

Les analyses des résultats du tableau 6, des figures 15 et 16 faites sur les lixiviats bruts montrent que la charge polluante est plus importante par rapport aux lixiviats filtrés pour les zones 3A et 3E. De plus, la charge polluante des lixiviats est toujours supérieure par rapport aux normes de rejet d'effluents publiques qui sont inférieure à 300 mg/L pour la DCO, si le flux journalier maximale est inférieure à 10 kg/J ; d'une concentration moyenne inférieure à 30 mg/L pour l'azote, si le flux journalier maximale est supérieur à 50 kg/L et d'une

concentration moyenne inférieur 10 mg/L pour le phosphore, si le flux journalier supérieur à 15 kg/J (**MINEPDED., 2012**).

Si toute la matière solide des eaux environnantes de la décharge est enlevée, les eaux seront toujours polluées. Car il a été constaté que la charge polluante est toujours plus élevée sur les eaux filtrées par rapport aux normes de rejets. Ces résultats sont en accord avec les résultats trouvés par (**Zahrani, 2006**).

III.4. COMPARAISON DE LA CHARGE POLLUANTE DES BRUTS ET DES LIXIVIATS FILTRÉS

LIXIVIATS

Tableau 7: comparaison de la charge polluante des lixiviats bruts et des lixiviats filtrés

Échantillons	Rapport DCO lixiviats	
	Filtrés/DCO lixiviats bruts	Ratios
Zone 3A	5250/7080	0.74
Zone 3C	666/740	0.90
Zone 3E	2510/3240	0.77
Bassin 1	1750/1750	1
Bassin 2	1032/1234	0.84

Les résultats du **tableau 7** nous permettent de voir que la filtration n'a pas d'effet sur le lixiviat. Ce qui veut dire que le lixiviat va continuer à polluer l'environnement.

De plus, ces ratios tendent vers 1 ce qui veut dire que presque toute la matière organique du lixiviat se retrouve sous forme soluble.

Au regard des résultats obtenus ci-dessus, on peut dire avec certitude que les eaux environnantes de la décharge sont polluées. Cette affirmation a aussi été arrêtée par **Ekani** en **2015**. Ce qui a amené à envisager un traitement pour les lixiviats venant de la décharge en mettant sur le site d'HYSACAM un système de traitement sur filtres plantés de roseaux.

III.5. CHARGE POLLUANTE DES LIXIVIATS DU SYSTEME DE TRAITEMENT DE FILTRES PLANTES DE ROSEAUX

III.5.1. Charge polluante des lixiviats du système de traitement de filtres plantes de roseaux du 22 mars 2016

Tableau 8: charge polluante de lixiviats traités sur filtres plantés.

Date	Échantillons	pH	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	DCO (mg/L)	N _T (mg/L)	P _T (mg/L)
22/03/2016	Bassin 1	7.4	7470	1750	102	13.9
	Entrée filtre 1	9.5	2170	320	18	3.2
	Sortie filtre 1	9.3	1670	265	18	1.5
	Sortie filtre 2	8.4	865	85	3	0

III.5.1.1 Effet de la charge polluante sur la conductivité

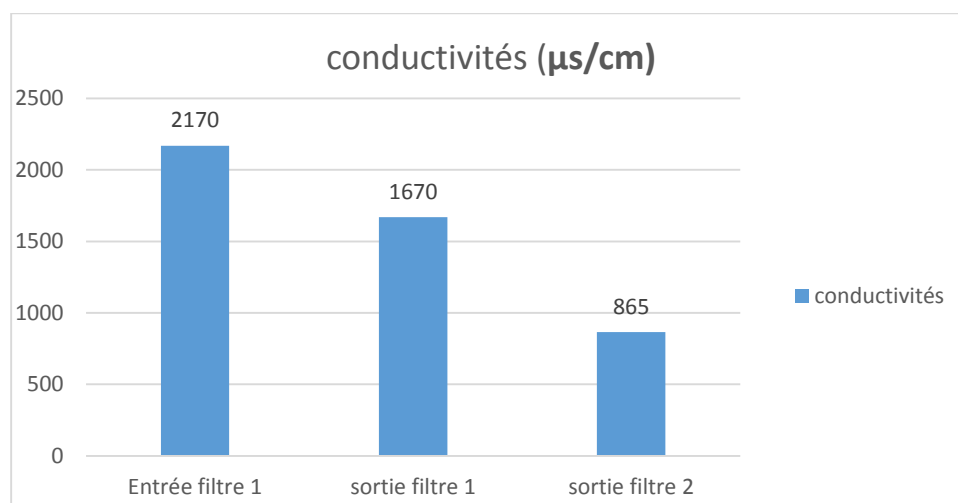


Figure 17: évolution de la conductivité des lixiviats du système de traitement

Le tableau 8 et la figure 17 montrent que la conductivité diminue progressivement au cours du traitement dans le système partant de 2170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à l'entrée du filtre 1 jusqu'à 865 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la sortie du filtre 2. Ceci s'explique par le fait que dans les deux filtres les plantes qui s'y trouvent ont adsorbé les matières minérales par le système racinaire pour leur développement.

III.5.1.2. Effet de la charge polluante sur la DCO

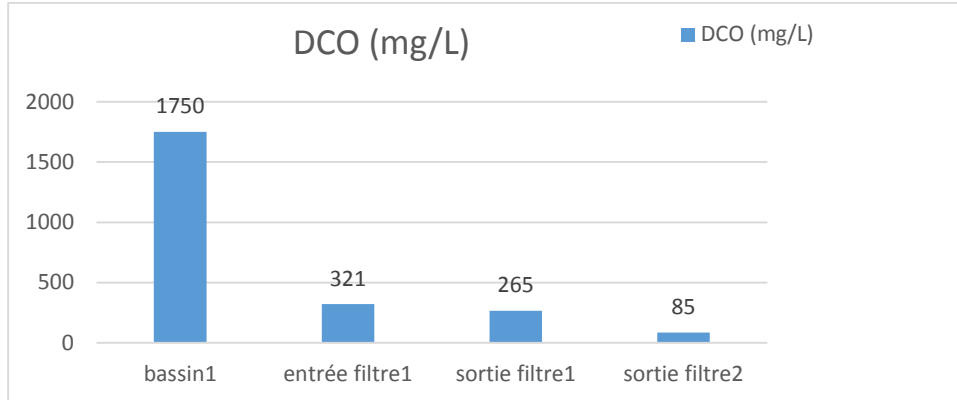


Figure 18: évolution de la DCO des lixiviats du système de traitement.

Le tableau 8 et la figure 18 montrent que la teneur en DCO diminue progressivement quittant de 321 mg/L à l'entrée du filtre 1 jusqu'à 85 mg/L à la sortie du filtre 2 qui est inférieure aux normes nationale et internationale de rejet des eaux usées qui est de 300 mg/L (voir annexe) ; pour un abattement de 73.52% de la DCO. Le bassin 1 est le lieu de prélèvement du lixiviats pour introduire dans le système on a à ce niveau une teneur en DCO de 1750 mg/L différente de celle de l'entrée du filtre 1 parce-que avant d'introduire dans celui-ci, une dilution a été d'abord effectuée avec de l'eau à cause de la viscosité des lixiviats qui pourra empêcher les adsorbants d'assimiler les polluants. Mais il est à noter que la composition du lixiviat varie ce qui veut dire qu'il nous faut chercher la valeur moyenne du rejet sur une période.

III.5.1.3. La charge polluante en azote et en phosphore dans les lixiviats du système de traitement.

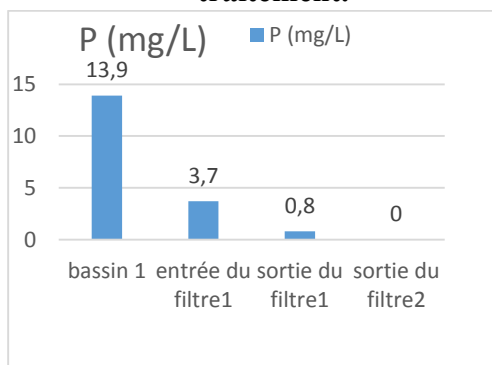


Figure 20: évolution du phosphore dans le système

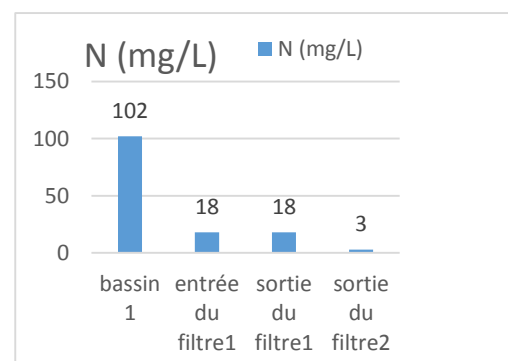


Figure 19: évolution de l'azote dans système

Le tableau 8 et la figure 19 diminution de la concentration de l'azote au cours du traitement partant de 18 mg/L à l'entrée du filtre1 jusqu'à

3 mg/L à la sortie du filtre 2 pour un abattement de 83.33% de l'azote. Par rapport au bassin 1 avec une concentration de 102 mg/L, d'après le taux d'abattement de l'azote, nous aurons un rejet de 16.8 mg/L très inférieur à la norme de rejet qui est inférieur de 30 mg/L ce traduit l'efficacité de notre système expliquant une forte adsorption de l'azote par les plantes présentes dans les filtres.

En ce qui concerne le phosphore, le tableau 8 et la figure 20 montrent bien évidemment que la concentration du phosphore diminue à aujour du traitement de 3,7 mg/L à l'entrée du filtre jusqu'à 0 mg/L à la sortie du filtre 2. Cela s'explique par le fait que tout le phosphore présent dans les lixiviats a été adsorbé par les plantes du système de traitement.

A cause du fait que la concentration de lixiviats varie avec le temps il est impératif d'effectuer un suivi du système de traitement afin de trouver une valeur moyenne de rejet dans la nature.

III.5.2 Charge polluante des lixiviats du système de traitement de filtres plantes de roseaux du mois d'avril 2016

Tableau 9: charge polluante de lixiviats traités sur filtres plantés en avril 2016.

Date	Échantillons	pH	Conductivité (μ S/cm)	DCO (mg/L)	N _T (mg/L)	P _T (mg/L)
13/04/2016	Bassin 1	9.2	3980	1510	75	7
	Entrée filtre 1	8.4	2275	284	18	1.8
	Sortie filtre 1	8.2	1405	186	8	1.5
	Sortie filtre 2	8.5	855	76	3	0
17/04/2016	Bassin 1	9.1	3980	1510	75	7
	Entrée filtre 1	8.7	2106	315	20	2.6
	Sortie filtre 1	8	1835	230	9	1.2
	Sortie fltre2	8.2	936	90	3.5	0

III.5.2.1 Effet de la charge polluante sur la conductivité

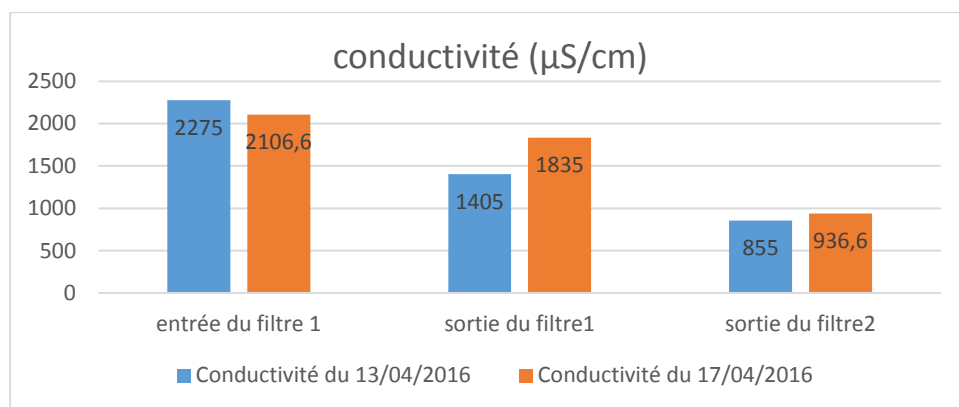


Figure 21: évolution de conductivité des lixiviats du système de traitement d'avril 2016

Le tableau 9 et la figure 21 montrent que la conductivité diminue au cours du traitement dans les deux périodes. Elle part de 2106.6 µS/cm à l'entrée du filtre1 jusqu'à 936.6 µS/cm à la sortie du filtre 2 pour la période du 17 Avril soit un abattement de 55,54% des substances minérales d'une part ; et d'autre part, elle quitte de 2275 µS/cm à l'entrée du filtre1 jusqu'à 855 µS/cm à la sortie du filtre 2 pour la période du 13 Avril soit un rendement de 62.4%.

Pour les 3 périodes, il y a eu une valeur moyenne de 885.5 µS/cm valeur inférieure à la norme qui est de 1000 µS/cm. Cette valeur traduit une élimination d'une importante quantité de charge minérale par le système de traitement. Ce qui entre en relation avec le fait que les plantes utilisent les substances minérales pour se développer.

III.5.2.2. Effet de la charge polluante sur la DCO

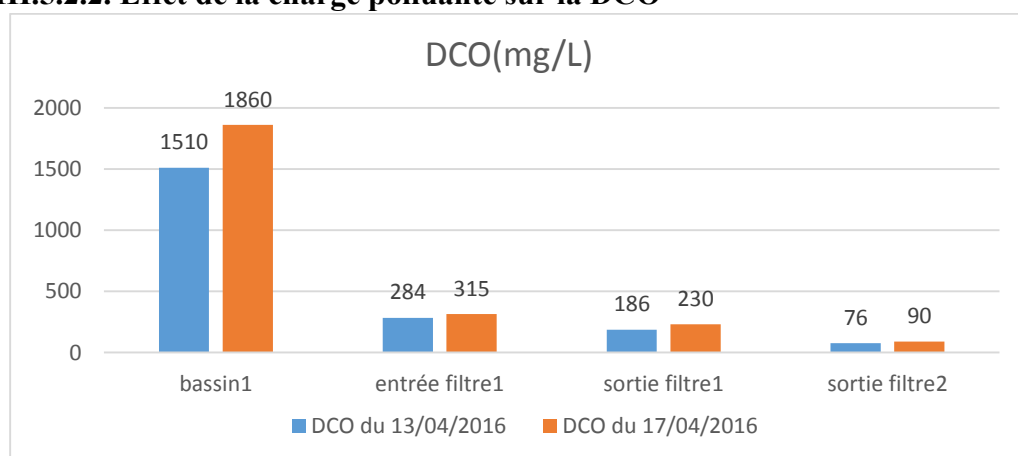


Figure 22: Evolution de DCO des lixiviats du système de traitement d'avril 2016

Le tableau 9 et la figure 22 montrent une diminution de la concentration de la DCO dans les deux périodes. Pour la période du 17 Avril, elle quitte de 315 mg/L à l'entrée filtre1; à 90 mg/L à la sortie du filtre 2 pour un abattement de 71.4% de la DCO d'une part et d'autre part pour la période du 13 Avril, elle quitte de 284 mg/L à l'entrée du filtre 1 jusqu'à 76 mg/L à la sortie du filtre 2 pour un abattement de 73.24% de la DCO.

Pour les trois périodes, il y a eu un abattement moyen de 72.72% soit un taux d'élimination moyenne de 72.72% de matières oxydables présentes dans les lixiviats par le système de traitement. Ainsi nous aurons une valeur moyenne 83.66 mg/L de rejet dans nature qui est inférieur à la norme qui est de 300 mg/L (voir annexe).

Ce résultat s'explique par le fait que, les plantes aquatiques réalisent la photosynthèse en présence du soleil pour produire de l'oxygène qui est transféré par la suite aux bactéries présents sur le système racinaire des plantes qui l'utilisera à son tour pour dégrader les matières organiques présentes dans l'effluent.

III.5.2.3. La charge polluante en azote et en phosphore dans les lixiviats du système de traitement du mois d'avril.

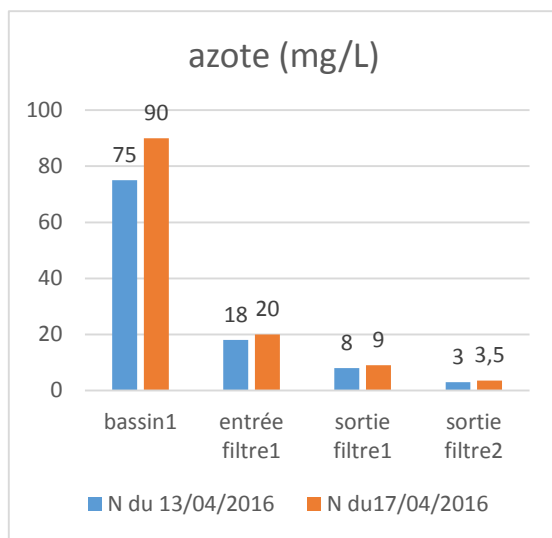


Figure 23: évolution d'azote de lixiviats du système

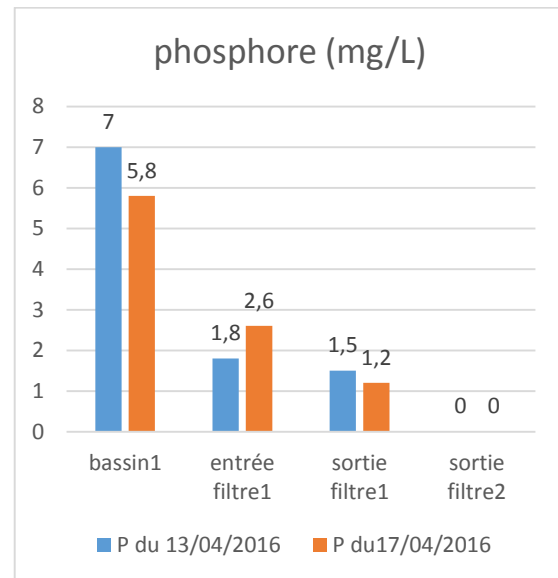


Figure 24: évolution de phosphore du système

Le tableau 9 et la figure 23 montrent que la concentration en azote diminue dans le système pour les deux périodes. Pour la période du 17 Avril, elle part de 20 mg/L à l'entrée du filtre 1 jusqu'à 3.5 mg/L à la sortie du filtre 2 pour un abattement de 82.5% d'Azote.

Pour la période du 13 Avril, elle part de 18 mg/L à l'entrée du filtre 1 jusqu'à 3 mg/L à la sortie du filtre 2 pour un abattement de 83.33% d'azote.

Pour les trois périodes de traitement, il y a eu un abattement moyen de 83% de l'azote ; ceci traduit un taux d'élimination de 83% d'azote dans les lixiviats par le système de filtres plantés. Il est à noter que les plantes ont besoin d'azote pour leur croissance ce qui explique une forte adsorption de l'azote dans le système de traitement. Cet azote est assimilé directement par les plantes sous forme d'ion nitrates (NO_3^-) et indirectement sous forme d'ion ammonium (NH_4^+)

Concernant le phosphore, le tableau 9 et la figure 24 montrent que la concentration en phosphore diminue dans le système jusqu'à s'annuler pour les deux périodes. Ce fait montre une absorption totale du phosphore. Ce qui explique cette absorption totale du phosphore est que le phosphore favorise la floraison, la fécondation et la fructification des plantes donc le phosphore est très indispensable pour les plantes.

Il est à noter que les valeurs moyennes obtenues au cours du traitement sont pour une petite dimension de filtres plantés (échelle pilote). L'alimentation était faite en mode continu avec un écoulement vertical.



INTÉRÊT PÉDAGOGIQUE

INTERETS PEDAGOGIQUE

Ce mémoire d'initiation à la recherche m'a permis en tant que futur Enseignants de :

- ❖ Assimiler certaines techniques de laboratoires telles que : les pesées, la filtration simple et sous vide, la préparation des solutions, les méthodes de caractérisation de certains composés qui nous permettrons de mieux expliquer à nos élèves les différents modes de préparation des solutions et mieux appréhender les exercices de type expérimental donnés lors des contrôles en classes et de examens officiels.
- ❖ Connaître un grand nombre de techniques analytiques.
- ❖ Développer un esprit critique, d'analyse, de jugement et de synthèse dans l'exploitation des documents.
- ❖ Mieux connaître le milieu de la recherche et de cerner la démarche relative au début d'un projet de recherche.
- ❖ Maîtriser mieux l'outil informatique qui constituera notre socle majeur lors de la saisie des sujets, des fiches de travaux dirigés.



CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Il était question dans ce travail de caractériser et de traiter les lixiviats de la décharge de Nkolfofoulou.

- ❖ Les résultats des analyses physico-chimiques des lixiviats ont révélé une forte charge organique, minérale. Les valeurs moyennes trouvées qui sont de 934 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité ; de 2241.6 mg/L pour la DCO et 512.4 mg/L pour l'azote sont supérieures aux normes nationales et internationales de rejets des eaux usées.
- ❖ Un risque de contamination de la nappe phréatique qui circule aux alentours de la décharge à de faibles profondeurs (environ 20 m) sur un sol perméable est favorisé par la charge polluante présente dans les lixiviats.
- ❖ Les analyses physico-chimiques des lixiviats effectuées sur le système de traitement ont montré une assimilation remarquable des polluants par le système qui répondent aux normes de rejets les plus strictes.

Il a été constaté que les eaux prélevées au niveau du ruisseau 2 situé près de la décharge sont les plus vulnérables à la contamination minérale et organique. Des valeurs moyennes qui sont de 102 mg/L pour la DCO et de 11 mg/L pour l'azote, sont très élevées par rapport aux normes d'une eau potable qui sont respectivement de : 13,80 mg/L pour la DCO, de 5,8 pour le pH et de 0,1 mg/L pour l'azote. Ces valeurs indiquent une forte contamination des eaux par les lixiviats. Ces résultats montrent une insuffisance du système de traitement installé par la société.

Dans le système de filtres plantés, les résultats obtenus révèlent un abattement de 73.24% de DCO, de 83% d'Azote et de 100% du phosphore provenant des valeurs moyennes de 306.33 mg/L de DCO, de 18.66 mg/L d'Azote et de 2.47 mg/L de phosphore à l'entrée du filtre 1 et de 83.66 mg/L de DCO, de 3.2 mg/L d'azote et 0 mg/L de phosphore à la sortie du filtre 2. Les valeurs obtenues à la sortie du filtre 2 sont inférieures aux normes de rejets des eaux usées qui sont respectivement de 300 mg/L pour la DCO et de 30 mg/L pour l'azote fixées (voir annexe). Ces résultats montrent l'efficacité du système de filtres plantés de roseaux dans le traitement des eaux usées. Ce qui laisse comprendre que ce système de filtres plantés est la méthode la moins coûteuse et la plus indiquée pour le traitement locale des eaux usées.

Pour améliorer la qualité de ce travail, nous envisageons :

- ❖ Déterminer le débit d'écoulement dans le système de traitement.
- ❖ Faire une DBO_5 en vue de déterminer l'âge du lixiviat de cette décharge.
- ❖ Déterminer les nitrates et les nitrites présents dans les lixiviats issus du système de traitement de cette décharge.
- ❖ Faire un balayage des métaux lourds dans les boues des différents bassins et dans le système de traitement de la décharge.
- ❖ Déterminer une relation entre la surface de contact et le taux d'abattement des différents paramètres issus du système de traitement.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agha Mohammadi N., bin Abdul Aziz H., Isa M.A., Zinatizadeh A. (2007)**
Powdered activated carbon augmented activated sludge process for treatment of semi-aerobic landfill leachate using response surface methodology, *Bioresource. Technol.* **98** 3570-3578.
- Amokrane A., Comel C., Veron J. (1997)** Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation, *Water Res.* **31** 2775-2782.
- Ávila Cristina., Matamoros Víctor., Reyes-Contreras Carolina., Piña Benjamí., Casado Marta., Mita Luigi., Rivetti Claudia., Barata Carlos., García Joan., Bayona Josep Maria.(2014)** Attenuation of emerging organic contaminants in a hybrid constructed wetland system under different hydraulic loading rates and their associated toxicological effects in wastewater *Science of the Total Environment* 470–471 1272–1280
- Bessala Ngoma. (2003)** Cameroun collectivités locales et gestion déléguée des déchets : cas de Yaoundé au Cameroun (2 – 6 décembre Yaoundé - Cameroun) à la Société Hygiène et Salubrité du Cameroun (HYSACAM)
- Bialowiec, A., Janczukowicz, W. Randerson P.F. (2011).** Nitrogen removal from wastewater in vertical flow constructed wetlands containing LWA/gravel layers and reed vegetation. *Ecological Engineering* 37 (6), 897e902.
- Chung, A.K.C., Wu, Y. Tam. N.F.Y., Wong, M.H. (2008).** Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater. *Ecological Engineering* 32, 81e89.
- Ehrig H.J. (1984)** Treatment of sanitary landfill leachate: Biological treatment, *Waste. Manage. Res.* **2** 131-152.
- Ekani Kevin A. (2015)** Caractérisation des lixiviats et eaux environnantes de la décharge de Nkolfoulou. Mémoire de D.I.P.E.S.II, Université de Yaoundé I, ENS.
- Fouad Z. (2006)** Contribution à l'élaboration et validation d'un protocole d'audit destiné à comprendre les dysfonctionnements des centres de stockages des déchets dans les pays en développement 2006 thèse de doctorat ISAL 0075.
- Guy Djombé (2013).** Incidences de la décharge de Nkolfoulou à Yaoundé sur son écosystème et la santé humaine Conférence internationale Africa 2013 sur l'Ecosanté, Université de Yaoundé I, PP. 12 -13.
- Kadlec Robert., H. And Wallace Scott. D.(2009)** *Treatment wetlands second edition* by Taylor & Francis Group, LLC International Standard Book Number-13: 978-1-56670-526-4 (Hardcover).
- Kanga K H., Shinb H.S., Parka H. (2002)** Characterization of humic substances present in Landfill leachates with different landfill ages and its implications, *Water Res.* **36** 4023–4032.
- Kehila Y., Aina M., Mezouari F., Matejka G., Mamma D.(2007)** Quelles perspectives pour l'enfouissement technique et le stockage éco-compatible des résidus solides dans

les ped vis-à-vis des impacts sur l'hydrosphère urbaine ? Acte des JSIRAUF, Hanoi, 6-9

- Kengne N. Ives. M. (2008)** Potentials of sludge drying beds vegetated with *Cyperus papyrus* L. and *Echinochloa pyramidalis* (Lam.) Hitchc. & Chase for faecal sludge treatment in tropical regions, Ph.D THESIS/Doctorat Degree in Plant Biology Speciality: Phytoremediation, University of Yaoundé 1.
- Lagier.(2000)** Étude des macro molécules de lixiviat : Caractérisation et comportement vis-à-vis des métaux. Thèse de Doctorat. Université de Limoges. **France.**
- Lim Y.N., Ghazaly Shaaban M., Yin C.Y. (2009)** Treatment of landfill leachate using palm shellactivated carbon column: Axial dispersion modeling and treatment profile, J. Chem. Eng. **146 86-89.**
- Linde K., Jönsson A.S.(1995)** Nanofiltration of salt solution and landfill leachate, Desalination. **103 223–232.**
- Linde K., Jönsson A.S., Wimmerstedt R. (1995)** Treatment of three types of landfill leachate with reverse osmosis, Desalination. **101 21-30.**
- MINEPDED. (2012).** Étude en vue de l'élaboration des normes d'aménagement et de gestion de décharges contrôlées au profit du ministère de l'environnement, de la protection de la nature et du développement durable ,103-104
- Ozturk I., Altinbas M., Koyuncu I., Arikan O., Gomec-Yangin C. (2003)** Advanced physicochemical treatment experiences on young municipal landfill leachates, Waste Manage. **23 441–446.**
- Polprasert C. and Kittipongvises S. (2011)** *Constructed Wetlands and Waste Stabilization Ponds*. In: Peter Wilderer (ed.) *Treatise on Water Science*, vol. 4, pp. 277-299 Oxford: Academic Press.
- Rodriguez J., Castrillon L., Maranon E., Sastre H., Fernandez E. (2004)** Removal of nonbiodegradable organic matter from landfill leachates by adsorption, Water Res. **38 3297–3303.**
- Rubio J., Souza M.L., Smith R.W. (2002)** Overview of flotation as a wastewater treatment technique, Miner. Eng. **15 139–155.**
- Saeed, T., Afrin, R., Muyeed, A., Sun, G. (2012)** Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh. Chemosphere **88, 1065e1073.**
- Silva A.C., Dezotti M., Sant'Anna Jr G.L. (2004)** Treatment and detoxication of a sanitary landfill leachate, Chemosphere. **55 207–214.**
- Sorber Lema J.M., Mendez R., Blazquez R. (1988)** Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: a review, Water. Air. Soil. Pollut. **40 223-250.**

- SOUHAILA TRABELSI. (2012)** Étude de traitement de lixiviats par le procédé d'oxydation avancé photochimiques et électrochimique. Application aux lixiviats de la décharge tunisienne Jebel Chakir thèse
- Sung Sung M., Chang D., Lee H.Y. (1997)** Performance improvement of an unstable anaerobic leachate treatment system in an industrial waste landfill, *Water. Sci. Technol.* **36** 333–340.
- Trebouet D., Schlumpf J.P., Jaouen P., Quemeneur F. (2001)** Stabilized landfill leachate treatment by combined physicochemical–nanofiltration process, *Water Res.* **35** 2935–2942.
- Vymazal, J., Greenway, M., Tonderski, K., Brix, H., Mander, U. (2006)** Constructed wetlands for wastewater treatment. In: Verhoeven, J.T.A., Beltman, B., Bobbink, R., Whigham, D.F. (Eds.), *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*, vol. 190, pp. 69e96.
- Vymazal, J. (1995).** *Algae and Element Cycling in Wetlands.* CRC Press Inc.
- Zhang Y. B., Zheng S J. and Sharp G. R. (2010)** Phytoremediation in Engineered Wetlands: Mechanisms and Applications *Procedia Environmental Sciences* **2** 1315–1325
- Zouboulis A., Jun W., Katsoyiannis A. (2003)** Removal of humic acids by flotation, *Colloids Surf. A, Physicochem. Eng. Aspects.* **231** 181–193.



ANNEXES

ANNEXE 1

Tableau 10: Normes de rejets et de potabilités des eaux dans le monde (MINEPDED., 2012).

Paramètres	Normes de potabilités des eaux au Cameroun	Normes de rejet des eaux au Cameroun	Normes de potabilités des eaux en France	Normes de potabilités des eaux de L'OMS
Température (°C)	≤ 25	30	30	-
pH	6,5 – 9,5	5,5 < Ph < 8,8 ; 9,5 s'il ya neutralisation alcaline	5,5 – 9,5	5,8
Conductivité (µs/cm)	≤ 1000	-	50	-
DBO₅ (sur effluent décanté) (mg/L)	-	< 100 mg/l, si flux journalier max < 30 kg/j < 30 mg/l au delà	50	9,660
DCO (sur effluent décanté) (mgO₂/L)	-	< 300 mg/l, si flux journalier max < 10 kg/j < 125 mg/l au-delà	250	13,800
Azote (mg/L)	≤ 50	Concentration moyenne mensuelle < 30 mg/l si flux journalier max > 50 kg/j.	< 0,1	≤ 50
Phosphore (mg/L)	-	Concentration moyenne mensuelle < 10 mg/l si flux journalier max > 15 kg/j	400-700	-

ANNEXE 2: APPAREILS, POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE, PRÉPARATION ET ANALYSES



Figure 25 : Dispositif de filtration sous-vide. Figure 26 : photographie du lixiviat



Figure 27 : photo point de rencontre lixiviat-fleuve. Figure 28 : photo du ruisseau aval



Figure 29 : photo sortie du filtre 2.

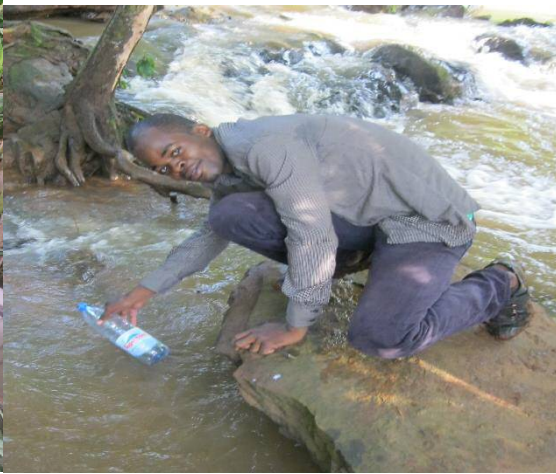


Figure30 : photo Amont du fleuve Nfoulou

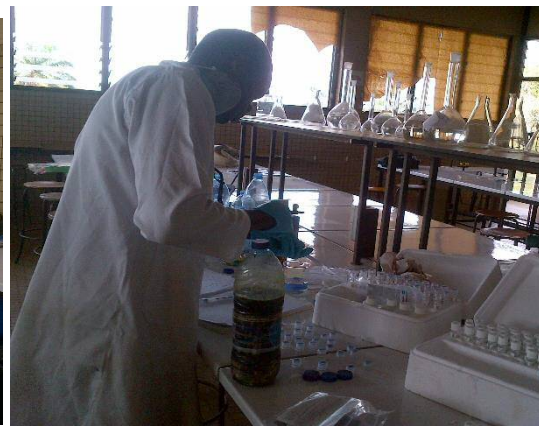


Figure 31 : photos de filtration (préparation des échantillons) et préparation au laboratoire de l'ENS.



Figure 32 : photos d'analyses au laboratoire de biotechnologies (UY1)



Figure 33 : photo du Spectrophotomètre.



Figure 34 : photo du digesteur.



Figure 35 : photo du PH-mètre.



Figure 36 : photo du Conductimètre