



**CARACTERISATION DES BOUES ET DES LIXIVIATS ISSUS DES
BOUES DESHYDRATEES A LA STATION DE TRAITEMENT DES
BOUES DE VIDANGE PAR LIT DE SECHAGE NON PLANTE DE
ZAGTOULI (OUAGADOUGOU).**

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER

**SPÉCIALITÉ : GÉNIE DE L'EAU DE L'ASSAINISSEMENT ET DES
AMÉNAGEMENTS HYDRO-AGRICOLES**

Présenté et soutenu publiquement le 24 janvier 2024 par

OUEDRAOGO Pascal (20180439)

Directeur de mémoire : Prof. Yacouba KONATE, Maître de Conférences CAMES, 2iE.

Structure d'accueil : **2iE**

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr Harinaivo A. ANDRIANISA ;**

Membres et correcteurs : **Mme S. Sonia YMELE SAAPI ;
M. Tontama SANOU.**

Promotion [2023/2024]

DEDICACES

A ma mère

Aucune expression ne suffirait à exprimer pleinement l'amour et l'affection que je ressens pour toi. Durant mes études, tu as été mon soutien constant, m'encourageant sans relâche, et ta présence réconfortante ne m'a jamais fait défaut. En cette journée mémorable pour nous deux, je t'offre ce travail en signe de reconnaissance profonde et d'estime sincère.

A la mémoire de mon père

Tu as toujours cru en moi, faisant de ma réussite ta priorité absolue. La chaleur de ta paternité me manque profondément, et chaque pensée à ton égard suscite une pointe de tristesse en moi.

A mon épouse Maïmouna

Tes prières ont été une constante dans ma vie, et en signe de reconnaissance, je t'offre ce travail qui n'aurait pas vu le jour sans ton aide précieuse, ta générosité infinie et tes encouragements constants. Aucune dédicace ne pourrait suffire à exprimer pleinement mes sentiments et mon attachement profond.

A mes filles :

Wendlassida Stéphanie ;

Wendémanédé Carine ;

Wenpouiré Alicia ;

Kassécré Audrey.

A mon frère Clément et mes sœurs Yvette, Hélène.

A ma belle-famille.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

Vous qui m'avez donné une lueur d'espoir malgré la profondeur du désespoir ; grâce à vous je continuerais le combat de la vie...

CITATIONS

« All things work together for good. »

Romans 8 :28

REMERCIEMENTS

Ce travail a été possible grâce à la collaboration, à l'assistance soutenue et à la compréhension d'un certain nombre de personnes. Au terme donc de ce travail, nous avons le plaisir d'adresser nos sincères remerciements à toutes ces personnes pour leurs apports multiformes.

Merci :

- au Professeur **El Hadji Bamba DIAW**, Directeur Général de notre Institut, et à ses collaborateurs, pour leur engagement envers l'amélioration de la qualité de l'enseignement ;
- au Professeur **Yacouba KONATE**, Responsable du LEHSA et notre encadreur, dont l'investissement sans faille a permis la supervision de notre travail malgré ses multiples responsabilités ;
- aux Enseignants-Chercheurs, Dr **Boukary SAWADO** et Dr **Roland YONABA**, dont les explications ont été d'une grande utilité ;
- aux messieurs **Noël TINDOURE** et **Moustapha OUEDRAOGO**, pour leur présence et leur accompagnement lors des analyses en laboratoire.
- à nos amis pour leurs disponibilités, leurs conseils et leurs soutiens morale au cours du stage;
- à **Hango, Rodrigue** et **Oswald** pour leur aide au cours des prélèvements sur le terrain ;
- à tous nos camarades de la promotion 2023/2024 pour leur soutien ;
- à ma famille pour leur patience et leur soutien inconditionnel durant ses années d'étude ;
- et tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la rédaction de ce document

Enfin, que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin et de quelque manière à la rédaction de ce document trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

RESUME

La problématique de la gestion des boues déshydratées reste entière. Aujourd'hui, c'est encore un défi pour les pays en développement, tels que le Burkina Faso, qui rencontrent des difficultés à valoriser ou éliminer correctement ces bio-solides, visant à réduire le risque de pollution environnementale. Leurs expositions incontrôlées génèrent sous l'effet des pluies des lixiviats qui peuvent être des vecteurs de pollutions. La présente étude a pour objectif de caractériser les boues déshydratées et les lixiviats issus de ces boues lors des précipitations au niveau de la STBV de Zagtoui. Pour ce faire, des échantillonnages, des analyses physico-chimiques et microbiologiques ont été réalisées sur les lixiviats pluviales, les lixiviats expérimentaux et les boues séchées pour évaluer leur qualité. Les paramètres examinés englobent, outre le pH et la conductivité, onze éléments chimiques majeurs (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , HCO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ et SO_4^{2-}), treize métaux lourds dont les plus importants sont Pb, Zn, Cd, Fe, Cu, Ni, Mn et Cr, cinq paramètres microbiologiques (CF, SF, Salmonelles, les œufs d'helminthes et les coliphages) et quatre paramètres organiques (DCO, DBO_5 , NTK et COT).

Les résultats obtenus montrent que les lixiviats pluviaux générés sont chargés en polluants divers dont les concentrations moyennes pour les paramètres physico-chimiques sont de : $\text{pH}=7,99$; $\text{CE}=10140 \mu\text{S.cm}^{-1}$; $\text{MES}= 503,93 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{DBO}_{5\text{brute}}=541,7 \text{ mgO}_2.\text{L}^{-1}$; $\text{DCO}=9853,8 \text{ mgO}_2.\text{L}^{-1}$; $\text{NH}_4^+=641,8 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{NO}_3^-=90,32 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{NO}_2^-=1,8 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{NTK}=753,36 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{PO}_4^{3-}=33,63 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{PT}=165,2 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Cl}^-=372,75 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{SO}_4^{2-}=1462,5 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{K}^+=840,9 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Ca}^{2+}=1050 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Mg}^{2+}=650 \text{ mg.L}^{-1}$ et les concentrations moyennes des paramètres microbiologiques sont : $\text{CF}=10^{+6} \text{ UFC}/100\text{mL}$; $\text{SF}=5,25.10^{+3} \text{ UFC}/100\text{mL}$; $\text{Salmonelles}=3,45.10^{+5} \text{ NPP}/100\text{mL}$; $\text{Coliphages}=1,54.10^{+4} \text{ UFP}/100\text{mL}$ et œufs d'helminthes=848 Nombre d'œufs/L. Tandis que les concentrations moyennes en ETM évalués sont : $\text{Fe}=19,34 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Zn}=1,59 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Mn}=1,32 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Al}=3,83 \text{ mg.L}^{-1}$.

De même, les résultats des lixiviats expérimentaux obtenus sont : $\text{pH}=6,4$; $\text{CE}=8100 \mu\text{S.cm}^{-1}$; $\text{DBO}_{5\text{brute}}=60 \text{ mgO}_2.\text{L}^{-1}$; $\text{DCO}_{\text{brute}}=927,5 \text{ mgO}_2.\text{L}^{-1}$; $\text{NH}_4^+=24,7 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{NO}_3^-=3350 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{NO}_2^-=9,4 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{PO}_4^{3-}=40 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{HCO}_3^-=620,2 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Cl}^-=1641,8 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{SO}_4^{2-}=3183,3 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Ca}^{2+}=710,4 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Mg}^{2+}=712,7 \text{ mg.L}^{-1}$ et les concentrations moyennes des paramètres microbiologiques sont : $\text{CF}=7,43.10^{+3} \text{ UFC}/100 \text{ mL}$; $\text{SF}=0 \text{ UFC}/100 \text{ mL}$; $\text{Salmonelles}=4,53.10^{+3} \text{ NPP}/100 \text{ mL}$ et œufs d'helminthes=300 Nombre d'œufs/L. Tandis que les concentrations moyennes en ETM évalués sont : $\text{Zn}=4,07 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Mn}=1,23 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{As}=0,031 \text{ mg.L}^{-1}$; $\text{Cu}=0,106 \text{ mg.L}^{-1}$.

En ce qui concerne les boues séchées, les résultats obtenus sont : $\text{pH}=6,87$; $\text{CE}=1889 \mu\text{S.cm}^{-1}$

¹ ; MS= 68,01% ; H= 31,99% ; M0= 29,55% ; COT= 14,77% ; MM= 70,45% pour les physico-chimiques et pour les paramètres microbiologiques les résultats sont :CF=3,26.10⁺⁵ UFC/gMS ; SF=4,03.10⁺³UFC/gMS ;Salmonelles=1,88.10⁺⁵ NPP/gMS;Coliphages=2,85.10⁺⁴ UFP/100m L; Œufs d'helminthes= 1 750 nombre d'œufs/gMS tandis que les ETM sont évalués en fonction de leurs concentrations moyennes Fe>Zn>Al>Mn>Cu>Cr>Ni>Co>Ag.

En somme, les lixiviats issus des boues déshydratées lors des précipitations ne répondent pas aux normes de rejet ou de réutilisation. A cela s'ajoute l'insuffisance de la gestion des bio-solides. Donc, il s'avère nécessaire d'une part de protéger les boues déshydratées contre les pluies et aussi de drainer les lixiviats provenant des boues déshydratées vers le système de lagunage et d'autre part de s'investir dans la voie de valorisation en compost des bio-solides car ayant une longue rémanence en éléments fertilisants.

Mots Clés :

1 - Boues déshydratées

2 – Lixiviat

3 – Percolation sur colonne

4 – Pollution

5 – Valorisation.

Abstract

The problem of dewatered sludge management remains unresolved. Today, it remains a challenge for developing countries such as Burkina Faso, which are struggling to properly recycle or dispose of these bio-solids in order to reduce the risk of environmental pollution. Their uncontrolled exposure to rainfall generates leachates that can be vectors of pollution. The aim of this study is to characterize dewatered sludge and the leachates produced from it during rainfall at the Zagtouli STBV. To this end, sampling, physico-chemical and microbiological analyses were carried out on rainwater leachates, experimental leachates and dried sludge to assess their quality. In addition to pH and conductivity, the parameters studied included eleven major chemical elements (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , HCO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ and SO_4^{2-}), thirteen heavy metals, the most important of which are Pb, Zn, Cd, Fe, Cu, Ni, Mn and Cr, five microbiological parameters (CF, SF, Salmonella, helminth eggs and coliphages) and four organic parameters (COD, BOD5, TKN and TOC).

The results obtained show that the rainwater leachates generated are loaded with various pollutants, with average concentrations for physico-chemical parameters of : pH =7,99 ; CE=10140 $\mu\text{S.cm}^{-1}$; MES= 503,93 mg.L^{-1} ; DBO5brute =541,7 $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$; DCO= 9853,8 $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$; NH_4^+ = 641,8 mg.L^{-1} ; NO_3^- = 90,32 mg.L^{-1} ; NO_2^- = 1,8 mg.L^{-1} NTK=753,36 mg.L^{-1} ; PO_4^{3-} =33,63 mg.L^{-1} ; PT=165,2 mg.L^{-1} ; Cl^- = 372,75 mg.L^{-1} ; SO_4^{2-} = 1462,5 mg.L^{-1} ; K^+ =840,9 mg.L^{-1} ; Ca^{2+} =1050 mg.L^{-1} ; Mg^{2+} =650 mg.L^{-1} and the average concentrations of microbiological parameters are : CF=10+6 CFU/100mL; SF=5.25.10+3 CFU/100mL; Salmonella=3.45.10+5 MPN/100mL; Coliphages=1.54.10+4 PFU/100mL and helminth eggs=848 Number of eggs/L. While the average concentrations of ETM evaluated are : Fe= 19.34 mg.L^{-1} ; Zn=1.59 mg.L^{-1} ; Mn= 1.32 mg.L^{-1} ; Al=3.83 mg.L^{-1} .

Similarly, the experimental leachate results obtained are: pH =6.4; EC=8100 $\mu\text{S.cm}^{-1}$; BOD5brute =60 $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$; CODbrute= 927.5 $\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$; NH_4^+ = 24.7 mg.L^{-1} ; NO_3^- = 3350 mg.L^{-1} ; NO_2^- = 9.4 mg.L^{-1} ; PO_4^{3-} =40 mg.L^{-1} ; HCO_3^- = 620,2 mg.L^{-1} ; Cl^- = 1641,8 mg.L^{-1} ; SO_4^{2-} =3183,3 mg.L^{-1} ; Ca^{2+} =710,4 mg.L^{-1} ; Mg^{2+} =712,7 mg.L^{-1} and the average concentrations of microbiological parameters are : CF=7.43.10+3 CFU/100 mL; SF=0 CFU/100 mL; Salmonella=4.53.10+3 MPN/100 mL and helminth eggs= 300 Number of eggs/L. While the average concentrations of TMEs assessed were: Zn=4.07 mg.L^{-1} ; Mn= 1.23 mg.L^{-1} ; As=0.031 mg.L^{-1} ; Cu= 0.106 mg.L^{-1} .

For dried sludge, the results obtained are: pH= 6.87; CE= 1889 $\mu\text{S.cm}^{-1}$; MS= 68.01%; H= 31.99%; M0= 29.55%; COT= 14.77%; MM= 70.45% for physico-chemical parameters and for

microbiological parameters the results are: CF=3.26. 10+5 CFU/gMS; SF=4.03.10+3 CFU/gMS; Salmonella=1.88.10+5 MPN/gMS; Coliphages=2.85.10+4 PFU/100mL; Helminth eggs= 1,750 number of eggs/gMS while TMEs are evaluated according to their average concentrations Fe>Zn>Al>Mn>Cu>Cr>Ni>Co>Ag.

In short, leachates from sludge dewatered during precipitation do not meet discharge or reuse standards. Added to this is the inadequate management of biosolids. It is therefore necessary to protect the dewatered sludge against rainfall and drain the leachate from the dewatered sludge to the lagoon system, and to invest in composting the biosolids, which have a long persistence of fertilizing elements.

Key words:

-
- 1 - Dewatered sludge**
 - 2 - Leachate**
 - 3 - Column percolation**
 - 4 - Pollution**
 - 5 - Recovery.**

LISTE DES ABREVIATIONS

2IE	:	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AFD	:	Agence Française de Développement
AFNOR	:	Association Française de Normalisation
BV	:	Boues de Vidange
CF	:	Coliformes Fécaux
CT	:	Coliformes Totaux
COT	:	Carbone Organique Total
DBO₅	:	Demande Biochimique en Oxygène en 5 jours
DCO	:	Demande Chimique en Oxygène
E. coli	:	Escherichia coli
ICP-OES	:	Inducted Coupled Plasma-Emission Optique à Plasma
ETM	:	Elément Trace Métallique
MES	:	Matières En Suspension
MS	:	Matières Sèches
MO	:	Matières Organiques
MODECOM	:	Mode de Caractérisation des Ordures Ménagères
MV	:	Matières Volatiles
MMS	:	Matières Minérales Sèches
MVS	:	Matières Volatiles Sèches
NNP	:	Nombre le Plus Probable
NTK	:	Azote Total Kjeldahl
OMS	:	Organisation Mondiale de la Santé
ONEA	:	Office Nationale de l'Eau et l'Assainissement
PT	:	Phosphore Total
SF	:	Streptocoques Fécaux
STBV	:	Station de Traitement des Boues de Vidange
UFC	:	Unité Formant Colonies
UFP	:	Unité Formant Particules
UNICEF	:	United Nations International Children's Emergency Fund
USEPA	:	Agence de Protection de l'Environnement des États-Unis

TABLE DES MATIERES

Dédicaces.....	i
Citations	ii
Remerciements	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	vi
liste des abréviations	viii
Table des matières.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES	xiii
Introduction	1
Objectif Général	2
Objectifs spécifiques	2
Chapitre I : Synthèse bibliographique	4
I.1. Généralités.....	4
I.1.1. Définitions des concepts.....	4
I.1.2. Objectifs et principe du traitement des boues.....	5
I.1.3. Les technologies de traitement existantes	7
I.2. Généralités sur les lixiviats.....	8
I.2.1. Les types de lixiviats	8
I.2.2. Mécanismes de formation des lixiviats	9
I.2.3. Quantification des lixiviats.....	10
I.3. Généralités sur les tests de lixiviation	11
I.3.1. Les différents tests de lixiviation.....	11
I.3.2. Les différents modes de lixiviation	12
I.4. Caractérisation du lixiviat issu des boues séchées.....	14
I.5. Caractéristiques physico-chimiques des lixiviats des boues séchées	14
I.6. Les Eléments Traces Métalliques	16
I.7. Caractéristiques microbiologiques des lixiviats des boues séchées.....	17
I.7.1. Les coliformes fécaux	17
I.7.2. Les streptocoques fécaux	17
I.7.3. Les salmonelles	18
I.7.4. Les coliphages.....	18
I.7.5. Les œufs d’helminthes	19
I.8. Caractéristiques et composition des boues séchées	19
I.9. La gestion des lixiviats et des boues séchées	20

I.10. La réutilisation des boues séchées dans le monde	21
I.11. La réutilisation des boues séchées au Burkina Faso	22
I.12. Les voies "d'avenir" pour la gestion des boues déshydratées	22
I.12.1. La pyrolyse (ou thermolyse).....	23
I.12.2. La gazéification.....	23
I.13. Cadre législatif et règlementaire en matière d'assainissement des eaux usées et des excréta au BF...	24
Chapitre II : Matériel et méthodes	25
II.1. Méthodologie générale de l'étude.....	25
II.2. Présentation de la zone d'étude.....	25
II.2.1. Description de la zone d'étude.....	25
II.2.2. Présentation de la STBV de Zagtoui.....	27
II.3. Echantillonnage	29
II.3.1. Catégorisation des échantillons.....	29
II.3.2. Echantillonnage sur le terrain	29
II.3.3. Méthode expérimentale du test de lixiviation par colonne au laboratoire.....	30
II.3. Prélèvement, transport et conservation des échantillons.....	31
II.4. Analyses au laboratoire	32
II.4.1 Méthodes d'analyses des paramètres physico-chimiques	32
II.4.2. Méthodes d'analyses des paramètres microbiologiques	34
II.4.3. Méthodes de calcul des paramètres physico-chimiques.....	35
II.4.3.1. Détermination de la MS, du H, de la MO et de la MM.....	35
II.4.4. Méthodes de calcul des paramètres microbiologiques	35
II.4.4.1. Détermination de la concentration des indicateurs de contamination fécale (CF et SF)	35
II.4.3.2. Détermination de la concentration en salmonelles	36
II.4.3.3. Détermination de la concentration des coliphages	37
II.4.3.4. Détermination de la concentration des parasites	37
Chapitre III : Résultats et discussions.....	38
III.1. Les paramètres physico-chimiques des lixiviats.....	38
III.1.1. Composition physico-chimique des boues séchées	38
III.1.1.1. Estimation des quantités des boues séchées.....	38
III.1.1.2. Composition physique des boues séchées.....	39
III.1.1.3. Composition chimique des boues séchées	40
III.1.1.4. Compositions microbiologiques des boues séchées.....	41
III.1.1.5. Concentration des ETM dans les boues déshydratées	43
III.2. Concentration en nutriments des boues déshydratées.....	43
III.2.1. Les paramètres physiques des lixiviats pluviaux	44
III.2.2. Les paramètres chimiques des lixiviats pluviaux.....	45
III.2.3. Caractérisations microbiologiques et parasitologiques des lixiviats pluviaux	47
III.2.4. Concentration des ETM dans les lixiviats pluviaux	49
III.3. Caractérisation des paramètres des lixiviats expérimentaux.....	49

III.3.1. Caractérisations physico-chimiques des lixiviats expérimentaux	49
III.3.2. Caractéristiques microbiologiques des lixiviats expérimentaux	51
III.3.3. Concentration des ETM dans les lixiviats expérimentaux	52
IV. Proposition de solution pour une meilleure gestion des boues séchées	54
IV. Conclusion.....	55
V. Recommandations	56
Bibliographie	57
Annexes	xiv

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Caractéristiques principales des différents types de lixiviats.	9
Tableau II: Les protocoles de tests de lixiviation des déchets fragmentés ou des boues.	12
Tableau III: Les protocoles de tests de lixiviat par colonne (essai par percolation).	13
Tableau IV: Caractéristiques des lixiviats des stocks de boues de Nador et des déchets solides.	15
Tableau V: Concentrations limites (mg/Kg) des ETM dans les bio-solides selon différentes études.	16
Tableau VI: Statistiques et normes des caractéristiques physico-chimiques des boues séchées.	20
Tableau VII: Les paramètres des analyses physico-chimiques des lixiviats et des boues séchées.	33
Tableau VIII: Les paramètres des analyses microbiologiques des boues séchées et des lixiviats.	34
Tableau IX: Estimation des quantités des boues séchées des STBV de Ouagadougou.	38
Tableau X: Composition physique des boues solides stockés de Zagtoui.	39
Tableau XI: La composition physico-chimique des boues déshydratées (n=10).	41
Tableau XII: Les paramètres microbiologiques et parasitologiques des boues séchées.	42
Tableau XIII: La concentration en ($\mu\text{g/gMS}$) des ETM des boues séchées (n=10).	43
Tableau XIV: Les paramètres chimiques des boues séchées.	44
Tableau XV: Les paramètres physiques des lixiviats pluviales.	44
Tableau XVI: La composition physico-chimique des lixiviats pluviaux.	46
Tableau XVII: Les résultats d'analyse des ions des lixiviats pluviaux.	46
Tableau XVIII: Les caractéristiques microbiologiques et parasitologiques des lixiviats pluviaux.	48
Tableau XIX: Concentration des ETM dans les lixiviats pluviaux de Zagtoui.	49
Tableau XX: Caractéristiques physico-chimiques des lixiviats expérimentaux issus des boues séchées brutes et boues séchées broyées.	50
Tableau XXI: Les paramètres microbiologiques des lixiviats issus des boues séchées brutes et des boues séchées broyées.	52
Tableau XXII: Concentrations des ETM des lixiviats expérimentaux.	53

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Etapes d'une bonne gestion des boues de vidange (EDE/EAA, 2014.)	6
Figure 2: Les différentes filières de traitement des boues de vidange (Strauss & Montangero, 2002).....	7
Figure 3: Diagramme illustrant les mécanismes de formation des lixiviats (Farquhar, 1989) 10	
Figure 4: Une vue de la zone d'étude et du site de la STBV avec sa zone d'influence.....	26
Figure 6: Une vue de la STBV de Zagtouli.....	28
Figure 7: Images des échantillons prélevés (1 : lixiviats pluviaux ; 2 : bio-solides ; 3 : lixiviats expérimentaux).....	29
Figure 8: Dispositif de collecte des lixiviats pluviaux (installation et collecte). Cliché Pascal, septembre 2022.	30
Figure 9: Schéma du dispositif expérimental du test de lixiviation sur colonne.....	31
Figure 10 : Composition massique en pourcentage des boues séchées.....	40

Introduction

L'humanité connaît une urbanisation en pleine croissance. En 2023, selon la Banque Mondiale, 56 % de la population mondiale vit en ville (4,4 milliards). Cette tendance à l'urbanisation devrait se poursuivre jusqu'en 2050, avec le doublement du nombre actuel de citoyens, atteignant près de sept personnes sur dix¹. Une grande partie de cette croissance est enregistrée dans les pays à faible revenu et à revenu intermédiaire inférieur.

Cette urbanisation accroît les besoins en logements, en services sociaux de base dont les services d'assainissement (Tayler, 2020). C'est pourquoi l'assainissement constitue un des principaux défis actuels des pouvoirs publics. Selon le programme conjoint d'évaluation de l'Organisation Mondiale de la Santé et de l'**United Nations International Children's Emergency Fund** (OMS/UNICEF) pour l'accès à l'eau et à l'assainissement², parmi la fraction actuellement desservie dans les pays en développement, on dénombre au moins 1,1 milliard de citoyens qui utilisent des ouvrages d'assainissement non collectif par latrines ou fosses septiques. C'est d'ailleurs pour cela, que la plupart des villes de ces pays sont qualifiées de « **ville-latrines** », d'où l'importance de la prise en compte de l'assainissement non collectif dans les pays en voie de développement.

Le Burkina Faso ne se déroge pas à cette réalité, les principales villes sont quasi-dépourvues de réseau d'égout. L'assainissement collectif ne concerne que les quartiers d'affaires, les administrations, quelques ménages et la zone industrielles (soit 2% du taux d'accès à l'assainissement selon l'Enquête Multi-sectorielle Continue de l'institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD, (2014)). C'est ainsi qu'en 2009, plus de 95% de la population de Ouagadougou avait recours à des ouvrages d'assainissement autonome pour la gestion des eaux usées et excréta (Bassan et al, 2010), faisant de l'assainissement non collectif le moyen le plus utilisé par la quasi-totalité des ménages. Cet état de fait génère d'énormes quantités de boues de vidange posant ainsi la problématique de la collecte, du transport et du traitement de ces boues. C'est pourquoi, l'une des priorités des autorités est la gestion des boues de vidange afin de préserver la santé de la population et lutter contre la pollution. C'est dans cette vision que l'Etat burkinabé et l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) ont réalisé la construction de trois (03) Stations de Traitement des Boues de Vidange (STBV)

¹ <https://www.banquemondiale.org/fr/topic/urbandevelopment/overview> ; consulté le 31/01/2024

² www.wssinfo.org; consulté le 15 octobre 2023

dans la ville de Ouagadougou et une quatrième en étude pour un bon maillage de la commune et des communes environnantes. Le traitement prévu sur ces stations prend en compte trois étages à savoir l'étage de la séparation solide/liquide, l'étage du traitement de la phase liquide et l'étage du traitement de la phase solide. Depuis leurs mises en service, les STBV connaissent des dysfonctionnements comme la présence de nuisances olfactives, l'insuffisance dans le système de traitement sur les lits, l'insuffisance dans le traitement des sous-produits, l'insuffisance dans l'aménagement des sites, l'insuffisance ou la quasi-absence de filières de valorisation des boues déshydratées,

C'est d'ailleurs le cas à la STBV de Zagtouli où les boues déshydratées sont stockées de façon anarchique à même le sol, à ciel ouvert, sans aménagement conséquent. Ainsi, pendant les saisons pluvieuses, les eaux pluviales constituent un facteur de création de nuisances par les phénomènes complexes (ruissellement, infiltration, contribution à la propagation de la pollution). Ces insuffisances pourraient engendrer des risques de pollution de l'environnement et des risques pour la santé.

C'est pourquoi, la présente étude a été initiée pour contribuer à l'amélioration de la gestion des boues de vidange et à la protection de l'environnement dans les STBV de la ville de Ouagadougou.

Pour ce faire, nous avons défini les objectifs suivants :

Objectif Général

Contribuer à une meilleure connaissance des boues déshydratées et des lixiviats issus de ces boues lors des phénomènes de précipitations dans la STBV de Zagtouli.

Objectifs spécifiques

- Déterminer les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des boues déshydratées
- Déterminer les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des lixiviats issus des boues déshydratées pendant la saison des pluies ;
- Réaliser un test de lixiviation en laboratoire avec les boues déshydratées en vue d'une meilleure caractérisation ;
- Proposer des solutions pour améliorer la gestion des boues déshydratées.

En plus de l'introduction et la conclusion, le présent rapport est structuré en trois grandes parties :

- une synthèse bibliographique : qui fait la revue bibliographique sur les boues déshydratées, les caractéristiques des lixiviats de façon générale dans les stations de

traitements ;

- une partie matériels/méthodes : qui présente le matériel et les méthodes d'échantillonnage, d'analyse des boues déshydratées et des lixiviats;
- une partie résultats/discussions : qui est relative à l'analyse des données obtenues sur le terrain et au laboratoire. L'interprétation des résultats et des discussions y relatives.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1. Généralités

I.1.1. Définitions des concepts

- **Les boues de vidange (BV)** sont définies comme étant des résidus extraits de systèmes d'assainissement non collectifs.

Les **boues de vidange** désignent les résidus solides non digérés ou partiellement digérés résultant du stockage ou du traitement des eaux usées dans des systèmes d'assainissement locaux tels que fosses septiques, latrines, fosses d'aisances, toilettes sèches et toilettes publiques.... (Raschid-Sally et Jayakody., 2008).

Les boues sont composées d'eau et de matières sèches, et leur classification dépend du pourcentage massique de matière sèche. Ainsi, une boue avec une siccité de 10 % contient 90 % d'humidité. On peut les catégoriser comme suit en fonction de la siccité :

- boues liquides : siccité de 0 à 10%.
- boues pâteuses : siccité de 10 à 25%.
- boues solides : siccité de 25 à 85%.
- boues sèches : siccité supérieure à 85%.

Les boues sèches : ce sont des boues dont la siccité est supérieure à 85%, stable, ne présente pas d'odeurs désagréable et riche en éléments fertilisants (azoté et phosphaté). Encore appelé **des bio-solides** : ce sont la fraction solide des boues de vidange ou des boues d'épuration qui est biochimiquement stable et hygiéniquement sûre et qui peut de ce fait être utilisée en agriculture comme amendement du sol ou fertilisant.

Une déshydratation des BV est une opération de séparation physique entre les phases liquides et solides que constituent les boues. Pendant l'opération, il y a une réduction partiellement des agents pathogènes principalement par dessèchement même si une biodégradation peut aussi avoir lieu.

La continuité de la déshydratation des boues par l'évaporation en dehors des lits de séchage permet d'obtenir des siccités élevées. Cela est important et intéressant du point de vue qualité. Par conséquent, il est recommandé de toujours contrôler le produit final obtenu pour garantir la conformité de ses caractéristiques avec son utilisation finale (Pierre-Henri. al, 2009).

- Le terme **lixiviat** encore appelé **lessivât** ou **percolât**, désigne par le jus de décharge qui a percolé à travers les déchets en se chargeant bactériologiquement et surtout chimiquement en substances tant minérales qu'organiques.

- **Les eaux pluviales** font référence au ruissellement des précipitations recueilli depuis les toits, les routes et d'autres surfaces avant de s'écouler vers les zones les plus basses. Toutefois, on qualifie spécifiquement d'eau pluviale la fraction du ruissellement qui ne s'infiltre pas dans le sol (Tilley et al., 2014).
- **Le percolât des boues de vidange** est la phase liquide qui résulte de la séparation mécanique des boues de vidange à travers des procédés d'épaississement, de filtration sur support physique, etc. Etant donné leur origine, les percolâts sont plus chargés que les effluents urbains et peuvent être traités individuellement ou co-traités avec les eaux usées municipales. Les objectifs de traitement, tels que le rejet dans le milieu naturel ou la réutilisation en agriculture, influent sur le choix des technologies et des procédés utilisés pour traiter la fraction liquide. (Tayler, 2018).

I.1.2. Objectifs et principe du traitement des boues

Le principe du traitement des BV est d'arriver à concentrer une large fraction des BV transportées et de traiter les sous-produits afin de garantir la non-dissémination des pathogènes dans l'environnement et contribuer à la valorisation (EDE/EAA, 2014). Cette valorisation peut consister au co-compostage pour l'agriculture, à l'épandage forestière, à la cimenterie ou à l'énergie. La figure 1 ci-dessous décrit les étapes d'une bonne gestion des boues de vidange :

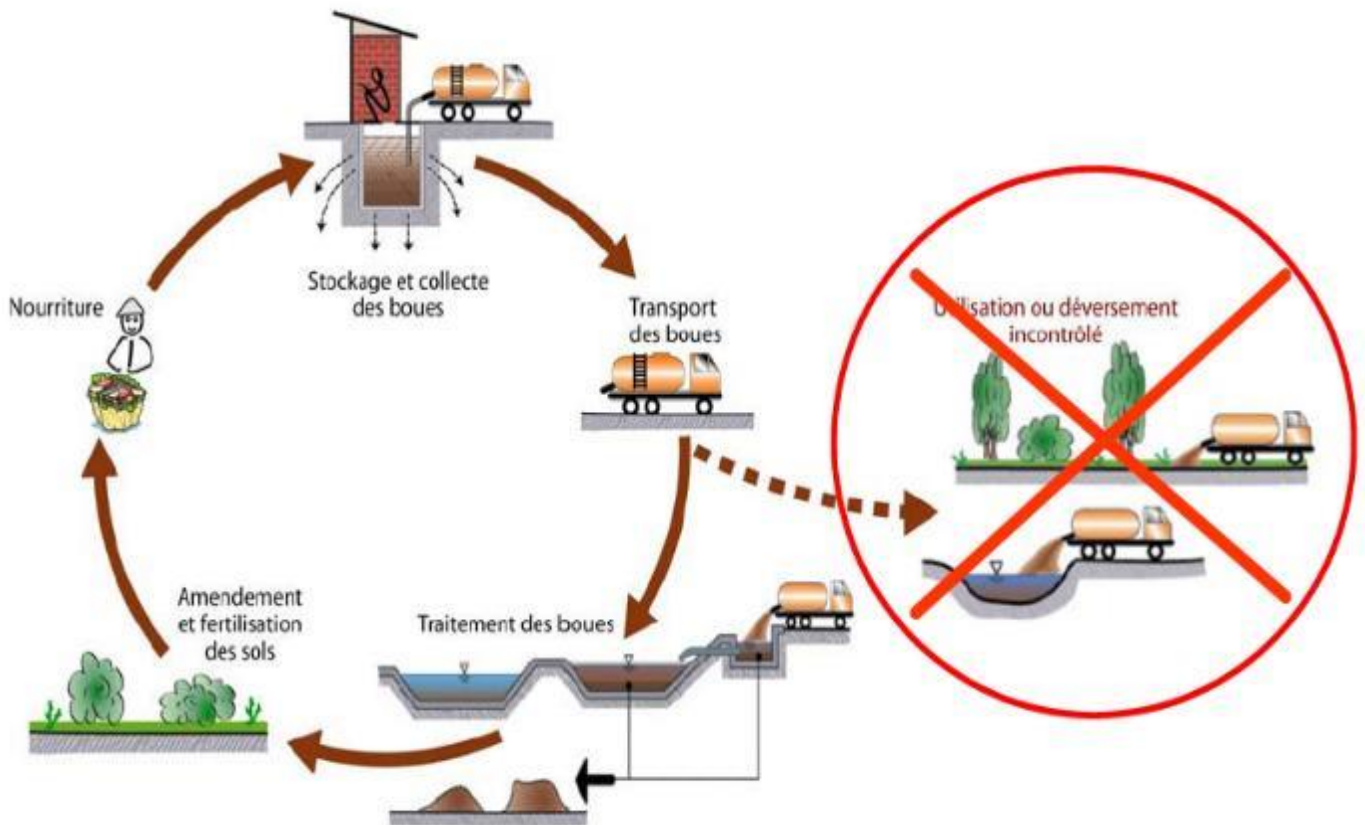


Figure 1: Etapes d'une bonne gestion des boues de vidange (EDE/EAA, 2014.)

Le traitement des BV brutes passe essentiellement par trois étages : l'étage de la **séparation liquide-solide** (déshydratation des BV), l'étage du traitement du percolât et l'étage du traitement des boues déshydratées.

Le traitement des boues est constitué de trois phases principales ayant pour objectifs :

- **La réduction de la teneur en eau** : elle vise à diminuer les quantités de boues à stocker et à valoriser ;
- **La stabilisation** : elle cherche à diminuer la fermentescibilité des boues afin de générer le moins possible d'odeurs. Le traitement des boues vise à prévenir la dissolution et la dispersion des composés nuisibles, toxiques ou polluants présents dans les boues, réduisant ainsi leurs impacts néfastes sur l'environnement. En somme la stabilisation consiste principalement à dégrader les matières volatiles susceptibles de relancer la fermentation.
- **L'hygiénisation** : elle est destinée d'une part à éliminer les micro-organismes contenus dans les boues d'épuration, et d'autre part à limiter les risques sanitaires et permettre une utilisation sur les sols agricoles. L'hygiénisation se définit

simplement comme l'ensemble des procédés visant à assurer une stabilité chimique réduisant la concentration des agents pathogènes dans les boues à des niveaux conformes aux normes de réutilisation en agriculture (EDE/EAA, 2014).

I.1.3. Les technologies de traitement existantes

Le traitement des boues de vidanges poursuit essentiellement les objectifs suivants : protéger la santé humaine et préserver l'environnement contre les risques associés au rejet (Kouawa, 2016). Ainsi, tous les traitements des boues concourent à l'atteinte de ces objectifs.

➤ Les filières de traitement des boues de vidange

Les filières de traitement des boues de vidange brutes comprennent généralement un prétraitement, souvent sous la forme d'un dégrillage, suivi d'un ou plusieurs procédés de traitement. Le traitement des boues de vidange se déroule typiquement en deux grandes étapes : la séparation de la fraction liquides et solides des BV puis le traitement des chacune des fractions. Cependant, il existe plusieurs méthodes de traitement des boues vidange. Le diagramme (figure 2) ci-dessous donne la description des différentes filières et méthodes de traitement.

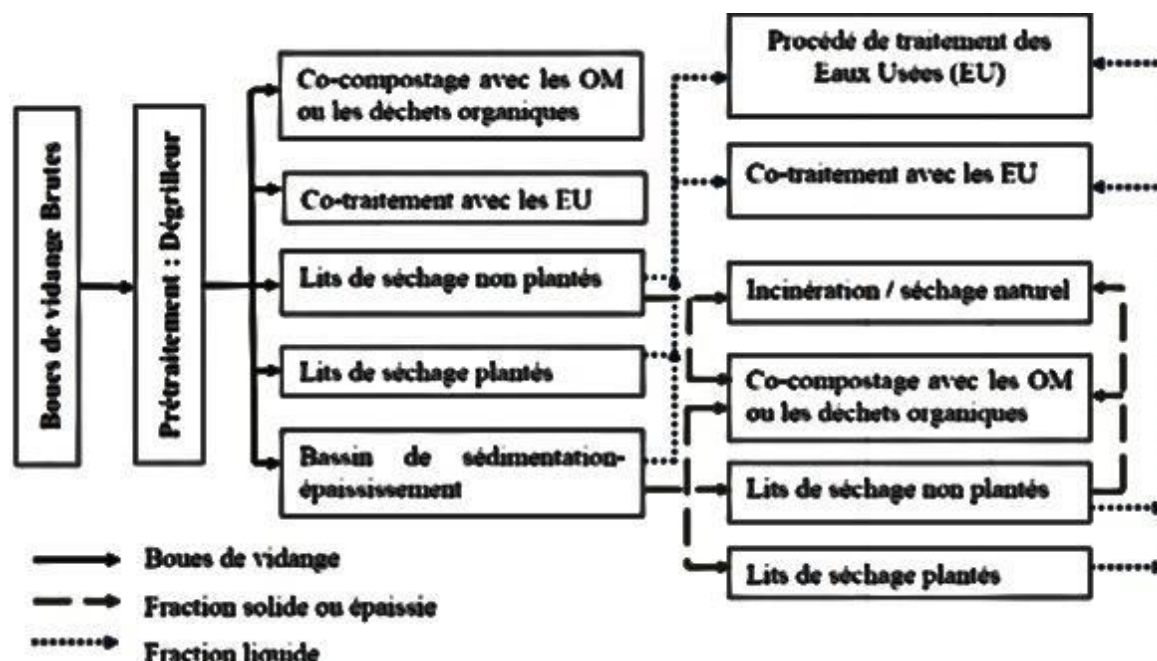


Figure 2: Les différentes filières de traitement des boues de vidange (Strauss & Montangero, 2002).

Parmi ces méthodes de traitement, les plus utilisés sont :

- lits de séchage non planté ;
- lits de séchage planté ;

- bassins de sédimentation/épaississement (Strauss & Montangero, 2002).

I.2. Généralités sur les lixiviats

Le lixiviat désigne les eaux qui ont percolé à travers le massif de déchets en se chargeant mécaniquement, bactériologiquement mais surtout chimiquement de substances minérales et organiques (Navarro et al., 1988). Cette pollution est composée principalement de matière de type organique, azotée et environnementale (couleur et odeur), et perdure tout au long de la vie des Centres de Stockage des déchets. Ainsi, les boues séchées stockées sont considérées comme des déchets car une des possibilités est la mise en décharge après les lits de séchage. Par analogie, les lixiviats des boues séchées peuvent se caractériser et se comparer de la même manière que les lixiviats des déchets solides ménagères.

I.2.1. Les types de lixiviats

Suivant le stade d'évolution biologique des déchets, trois types de lixiviats sont à distinguer :

➤ Les lixiviats jeunes (<5 ans)

Les lixiviats jeunes se compose par une forte matière organique, d'acide gras volatils et des ETM. Cette charge organique élevée donne la capacité aux lixiviats d'être facilement biodégradable. Les lixiviats jeunes ont généralement un pH acide ($<6,5$), un rapport $DBO_5/DCO > 0,5$ et une forte teneur en métaux pouvant atteindre 2 g.L^{-1} .

➤ Les lixiviats intermédiaires

Lorsqu'une décharge vieillit, on assiste à une décroissance de la matière organique et à une stabilité des déchets. Les lixiviats intermédiaires se caractérisent par composés des grosses moléculaires, une baisse de la biodégradabilité, une raréfaction des acides gras volatiles, un pH tendant à la neutralité et des ETM négligeable.

➤ Les lixiviats stabilisés (> 10 ans)

Les lixiviats sont dits stabilisés lorsqu'ils sont difficilement ou voire impossibles de les traités. Ils se caractérisent par une faible charge organique, des substances humiques, de molécules à gros poids qui sont réfractaires à la biodégradation. C'est le stade de la maturité des décharges. Le tableau I présente les principales caractéristiques des différents types de Lixiviats (Trabelsi, 2011).

Tableau I: Caractéristiques principales des différents types de lixiviats.

	Lixiviats jeunes	Lixiviats intermédiaires	Lixiviats stabilisés
Age de la décharge	< 5 ans	5 à 10 ans	> 10 ans
pH	< 6,5	6,5 à 7,5	> 7,5
DCO (mg L ⁻¹)	10 000 à 20 000	5 000 à 10 000	< 5 000
DBO ₅ /DCO	> 0,5	0,1 à 0,5	< 0,1
Biodégradabilité	Bonne	Assez faible	Très faible
AGV* (% du COT)	> 70	5 à 30	< 5

AGV* : acides gras volatils.

I.2.2. Mécanismes de formation des lixiviats

Les lixiviats sont générés lorsque la valeur de la teneur en eau (taux d'humidité) dépasse la valeur maximale de rétention. Cette valeur maximale de rétention se définit comme la valeur maximale de liquide que peut contenir un milieu poreux sans production de percolât (M. El-Fadel et al., 2002). Ce processus dépendra de facteurs multiples que sont :

- **les facteurs climatiques et hydrogéologiques** : les pluies, l'intrusion des eaux souterraines ; ...
- **la qualité des déchets ou des boues** : 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... ;
- **les mécanismes internes** : décomposition des composés organiques, formation de biogaz et de la chaleur.

La formation des lixiviats met en contribution le pouvoir tampon du pH, la salinité et le potentiel d'oxydo-réduction de la solution percolant à travers les déchets. La porosité de la partie solide et leur surface jouent sur la cinétique du phénomène.

Le processus biologique est une superposition de réactions aérobies et anaérobies avec la production de métabolites comme les acides aminés, les acides gras volatils, les aldéhydes, les carbonates, les bicarbonates, les nitrates, les ammoniums, les sulfures, ...

La combinaison des métabolites avec les sels minéraux crée des effets de complexation et précipitation (Trabelsi, 2011).

I.2.3. Quantification des lixiviats

Pour l'évaluation de la quantité de lixiviat, l'on se base sur le cheminement des eaux de pluies qui tombent sur la surface des boues séchées et des (02) deux possibilités qui s'offrent à elles comme toutes décharges : l'infiltration d'eau à travers la couverture et le ruissellement de surface. A cela, s'ajoute l'eau perdue par évapotranspiration sous l'effet du soleil et de la végétation. L'eau produite pendant les processus de dégradation de la matière organique est additionnée pour l'évaluation de la quantité de lixiviat. La figure 2 illustre bien le cheminement des eaux de pluies :

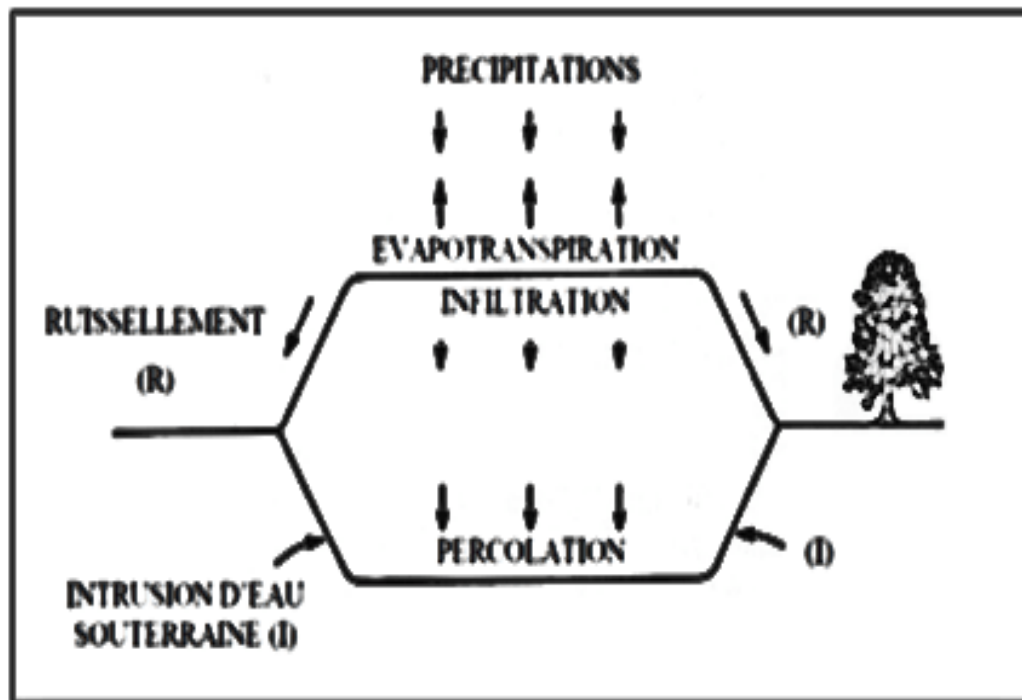


Figure 3: Diagramme illustrant les mécanismes de formation des lixiviats (Farquhar, 1989)

L'évaluation des volumes de lixiviats produits peut être obtenue en faisant un bilan hydrique en tenant compte des conditions naturelles et du mode d'exploitation

$$P + E_D + R_1 = I + E + E_{TR} + R_2$$

Avec :

P : le volume des eaux des précipitations ;

E_D : le volume d'eau apporté par les déchets/boues ;

R₁ : le volume d'eau apporté par ruissellement ;

I : le volume de lixiviat infiltré dans le sous-sol à travers le fond de la décharge ou dans le sous-sol sur lequel repose les boues déshydratées ;

E : le volume de lixiviat collecté ou lixiviat ruisselé ;

E_{TR} : le volume d'eau éliminé par évapotranspiration réelle ;

R₂ : le volume d'eau exporté de la décharge par ruissellement.

Cette équation ne tient pas compte des phénomènes réels complexes, mais les paramètres qu'elle incorpore sont suffisamment sensibles. Elle permet de prédire l'évolution du système dans le temps en utilisant des modèles ajustés aux observations sur le terrain.

I.3. Généralités sur les tests de lixiviation

I.3.1. Les différents tests de lixiviation

L'évaluation de la capacité de relargage des polluants à partir des matériaux dans l'environnement se fait par le biais d'essais de lixiviation. Ces essais permettent d'analyser le comportement environnemental de divers matériaux, tels que les sols ou les "boues séchées".

Le rapport n°42 de l'Académie des sciences ([IFAS 1998]) définit la lixiviation comme une extraction par voie liquide d'éléments ou de molécules (inorganiques et organiques) présents ou fixés sur une matrice solide par des processus chimiques ou biologiques. Selon l'Association Française de Normalisation (AFNOR), l'essai de lixiviation consiste en une extraction liquide-solide d'un échantillon en contact avec une solution aqueuse, dans le but d'extraire certains éléments en vue de caractériser et d'évaluer les constituants susceptibles d'être lixiviés à partir du déchet. Plusieurs normes d'extraction existent, dépendant des objectifs visés, pouvant impliquer un ou plusieurs essais d'extraction successifs [AFNOR 1992] [AFNOR 2000] [Comité Européen de Normalisation (CEN) 2002-12457] (Yixuan, 2011). Le Tableau II présente les protocoles et références de tests de lixiviation des déchets fragmentés ou des boues.

Tableau II: Les protocoles de tests de lixiviation des déchets fragmentés ou des boues.

Référence	EN 12457 Partie 1	EN 12457 Partie 2	EN 12457 Partie 3	EN 12457 Partie 4
Nom	Lixiviation-Essai de conformité pour la lixiviation des déchets fragmentés ou des boues (2002)			
Comité	Comité Européen de Normalisation (CEN)			
Pays	Norme Européenne			
Forme du matériau	Granulat, 95% de grain ≤ 4 mm, teneur en MS $> 33\%$ (Sans ou avec réduction de la granularité)			
Nature du lixiviant	Eau déminéralisée $5 < \text{pH} < 7.5$			
Déroulement	Sous agitation			
Rapport liquide/solide (L/S)	2 L/Kg	4 L/Kg	8 L/Kg	10 L /Kg
Nombre d'extraction	1 fois			
Durée	24 heures			

L'immersion des résidus solides dans de l'eau est à l'origine du transfert des composants polluants vers la solution aqueuse (Chen, 2012). Pour prédire le comportement des déchets en fonction du temps, l'on s'appuie sur les tests de lixiviation. Il existe plusieurs protocoles de tests dont les méthodes peuvent être classées en deux groupes : les tests d'extraction sans renouvellement du lixiviant, et les tests dynamiques avec renouvellement du lixiviant (Hartwell et Calovini, 1999 cités par Chen, 2012).

I.3.2. Les différents modes de lixiviation

Les modes de tests de lixiviation dépendent des conditions in situ dans lesquelles elles s'opèrent. Il y a deux modes de test de lixiviation : le test de lixiviation en colonne et le test de lixiviation batch (Maszkowska et al., 2013) :

➤ La lixiviation en colonne

Elle consiste à réaliser un système permettant d'assurer un écoulement ascendant ou descendant du lixiviât à travers un matériau granulaire (boues séchées ou déchets). Ce test est utilisé lorsqu'on recherche à s'approcher des cas réels de l'infiltration des eaux pluviales sur les boues. Les espaces poreux des matériaux permettent au lixiviant de traverser la matrice qui est en contact avec le fluide et assure le transport des constituants.

Il existe trois types de transport des constituants : transport par la convection, la dispersion cinématique et la diffusion moléculaire. Le rapport de liquide/solide varie de 0.1 à 10 L/kg. Le démarrage d'un essai commence d'abord par un compactage de la colonne et une pré-saturation du matériau contenue dans la colonne afin d'obtenir un équilibre du système sont demandés. Le débit est ajusté par rapport à la longueur et au diamètre de la colonne pour obtenir une vitesse linéaire de 15 cm/jours. Le tableau III présente les protocoles et références de tests de lixiviation par percolation sur colonne.

Tableau III: Les protocoles de tests de lixiviat par colonne (essai par percolation).

Référence	prEN 14405	NEN 7343
Nom	Essai de comportement à la lixiviation-Essai de percolation à écoulement ascendant (Mai 2002)	Determination of leaching behaviour of granular materials in a column test (1993)
Comité	Comité Européen de Normalisation (CEN)	Institut de Normalisation du Pays-Bas (NNI)
Pays	Norme européenne	Norme néerlandaise
Forme du matériau	Granulat, 95% de grain ≤ 4 mm	Granulat, 95% de grain ≤ 4 mm
Nature du lixiviant	Eau déminéralisée	Eau déminéralisée, pH=4
Déroulement	Compactage de la colonne et pré-saturation du matériau, débit linéaire 15 cm/j, filtration de soluté	Percolation ascendante, sept prélèvements avec L/S croissants
Rapport liquide/solide (L/S)	De 0.1 à 10 L/kg	De 0.1 à 10 L/kg
Résultats	Exprimés en fonction de L/S, concentration du constituant dans le lixiviant en mg/L	Exprimés en fonction de L/S, concentration du constituant dans le lixiviant en mg/Kg

➤ La lixiviation en batch

Ce test est plus très simple à mettre en œuvre. La mise en œuvre implique le contact entre un lixiviant et un matériau monolithe, avec un rapport liquide/solide (L/S) et une durée spécifique. Cette situation se produit concrètement lorsque la perméabilité d'une décharge est inférieure à celle du sol environnant. Dans ce cas, l'eau de ruissellement a tendance à contourner la masse de déchets, établissant un contact par lixiviation de la couche externe du matériau (Han *et al.*, 2009).

Les paramètres du test de lixiviation sont variables et dépendent des objectifs spécifiques ainsi que des conditions réelles du terrain. Ces paramètres incluent la durée de lixiviation, la nature du lixiviant (eau distillée ou eau acidifiée, pH), le rapport liquide/solide (L/S), et la durée ainsi que le mode de contact entre l'eau et le solide (retournement, agitation, percolation)(Quina et al., 2011). Le test de lixiviation par colonne, également connu sous le nom de test de percolation, offre des informations détaillées et précises, bien que sa durée soit relativement longue. En revanche, la lixiviation en batch est rapide, simple et son coût est limité (Chen, 2012).

I.4. Caractérisation du lixiviat issu des boues séchées

La genèse du lixiviat est une conséquence de l'infiltration dans la masse de boues des eaux de pluies et des eaux de ruissellement. Ainsi, la caractérisation des lixiviats issus des boues séchées consiste à une détermination de la charge organique, minérale et métallique. De même, la caractérisation du lixiviat issu d'un test de lixiviat et des boues séchées répondent également à la détermination des mêmes charges.

I.5. Caractéristiques physico-chimiques des lixiviats des boues séchées

Généralement, le lixiviat est une eau usée à haute résistance avec une conductivité élevée, riche en ammonium et en matière organique. Il peut être décrit comme un mélange à plusieurs composants de substances insolubles, solubles, inorganiques, organiques, non ioniques, ioniques, bactériennes et bactériologiques dans une solution aqueuse. Étant donné que ces composants sont solubles dans l'eau, il existe un risque élevé qu'ils se rependent dans les eaux de surface et souterraines (Dounavis et al., 2019). Ainsi, la biodégradation et la minéralisation de la matière organique impliquent la production de nutriments par les communautés microbiennes (bactéries, champignons) et la libération d'éléments assimilables (K, Ca, Mg, K, etc.). De plus les anions lessivés sont les sulfates. Les sulfates sont généralement fortement présents dans les lixiviats (Robinson et Lucas, 1985).

La composition des lixiviats est fonction de plusieurs paramètres, à savoir la nature et l'âge de la décharge, le type des déchets, la méthode d'enfouissement, la nature du site, les conditions climatiques...(Khattabi et al., 2002). Malgré la complexité du lixiviat, quatre groupes de polluants caractérisent le lixiviat (Christensen et al., 1994) :

- La matière organique dissoute,
- Les composés organiques anthropiques (hydrocarbures aromatiques, phénols, composés aliphatiques chlorés...) avec une concentration inférieure à 1 mg/L,
- Les composés minéraux majeurs tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} ,

- Les métaux lourds (Zn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb...) présents à l'état de traces.

Les principales mesures utilisées pour caractériser un lixiviat comprennent la Demande Chimique en Oxygène (DCO), la Demande Biologique en Oxygène (DBO), le Carbone Organique Dissous (COD), l'azote Kjeldhal (NTK), le pH, la conductivité, les métaux, etc.

Le tableau IV montre une comparaison sur les caractéristiques des lixiviats des stocks de boues et les lixiviats des déchets solides faite au Maroc (Zerrouqi et al., 2011).

Tableau IV: Caractéristiques des lixiviats des stocks de boues de Nador et des déchets solides.

	Lixiviat des stocks de boues ^a		Lixiviat des déchets solides ^b	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
CE (mS.cm ⁻¹)	8,04	65,3	4,5	14
Sal. (g.l)	4,4	44,3	nd	nd
T (°C)	13,6	27,4	nd	nd
pH (*)	7,79	9,24	5,2	8,5
N-NO ₃ (mg.L ⁻¹)	0,95	88,62	0,05	35
N-NH ₄ (mg.L ⁻¹)	0	17,8	71	600
N-NO ₂ (mg.L ⁻¹)	0	0,08	0,02	35
PO ₄ (mg.L ⁻¹)	2,69	20,87	0,1	10
PT (mg.L ⁻¹)	2,11	88,79	nd	nd
NTK (mg.L ⁻¹)	91	1 436	2	600
MES (mg.L ⁻¹)	46	1 656	50	1 040
DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	40	800	4 000	68 000
DCO (mg.L ⁻¹)	1 892	26 288	6 000	152 000
Ca (mg.L ⁻¹)	561	1 251	14	775
Mg (mg.L ⁻¹)	19,44	3 246	2	900
K (mg.L ⁻¹)	200	2 693	17	1 250
Na (mg.L ⁻¹)	1 275	14 550	153	3 006
SO ₄ (mg.L ⁻¹)	1 856	17 758	5	645
Cl (mg.L ⁻¹)	4 119	24 492	282	3 960
Cd (µg.L ⁻¹)	1	3	2	110
Cr (µg.L ⁻¹)	5	9	27	440
Cu (µg.L ⁻¹)	65	168	26	5 000
Ni (µg.L ⁻¹)	59	197	50	2 680
Pb (µg.L ⁻¹)	16,4	21	20	320
Zn (µg.L ⁻¹)	75	246,5	41	54 000

a : Présente étude; b : ADAM et VASEL, 1998; c : EHRIG, 1989, ROBINSON et GRONOW, 1993; nd : non déterminé (Zerrouqi et al., 2011).

I.6. Les Éléments Traces Métalliques

Les métaux lourds posent un problème environnemental en raison de leur toxicité et de leurs effets néfastes à long terme sur les sols. Leur introduction dans les systèmes d'assainissement résulte souvent d'une utilisation incorrecte par les ménages, notamment le déversement d'objets tels que piles, solvants et peintures. La concentration totale en Éléments Traces Métalliques (ETM) dans les boues est souvent supérieure à la concentration en ETM biodisponibles pour la végétation. Cette caractéristique peut être exploitée dans la réhabilitation des sites contaminés par les métaux. (Kengne et al., 2009).

Cependant, l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (**USEPA**) a fixé des limites en teneur de métaux lourds pour la réutilisation des boues issues du traitement des eaux usées en s'appuyant sur la valeur cumulée des ETM dans le sol après 100 ans d'épandage ; estimé comme le « scénario du pire ». Les valeurs limites en concentration des ETM fixées pour la protection de la santé humaine et environnementale sont conservatives, mais moins que celles fixées par les réglementations existant en Europe. Un aperçu de ces limites réglementaires est présenté dans le tableau V ci-dessous (Kengne et al., 2009):

Tableau V: Concentrations limites (mg/Kg) des ETM dans les bio-solides selon différentes études.

Paramètres	Bio-solides de qualité exceptionnelle (USEPA, 1999)	Compost Ecolabel (Hogg et al., 2002)	Utilisation des bio-solides en Espagne (Hogg et al., 2002)
Arsenic (As)	41		
Mercure (Hg)	17		
Fer (Fe)	nm	-	-
Plomb (Pb)	300	100	750
Nikel (Ni)	420	50	300
Chrome (Cr)	1 200	100	1 000
Cadmium (Cd)	39	1	20
Cuivre (Cu)	1 500	100	1000
Zinc (Zn)	2 800	50	2 500
Sélénium (Se)	36	-	-

I.7. Caractéristiques microbiologiques des lixiviats des boues séchées

Les études sur la biodiversité microbiologie des lixiviats ont pour objectifs de dénombrer les différents germes et d'apprécier le niveau d'hygiénisation des boues séchées. La caractérisation revient à la recherche des microorganismes suivants : les germes témoin d'indicateur fécale (les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux), et surtout les autres bactéries pathogènes (salmonelles), les parasites (les œufs d'helminthes) et les virus (Coliphages). Ainsi, selon l'étude de Benoit., (2015).

Le destin des pathogènes au cours des processus de séparation solides-liquides des boues de vidange dépend de leur taille et du degré d'association des particules. En raison de leur taille importante, les œufs d'helminthes sont concentrés avec les bio-solides, tandis que les bactéries et les virus peuvent se retrouver à la fois dans les boues séchées et dans le liquide, tel que le percolât ou le lixiviat.

Effectivement, la concentration d'œufs d'helminthes se révèle être un indicateur essentiel pour évaluer la qualité hygiénique et sécuritaire des sous-produits provenant des boues de vidange. Ces sous-produits peuvent être valorisés sous forme de biofertilisant ou d'amendement organique (Ingallinella et al., 2002).

I.7.1. Les coliformes fécaux

Les coliformes fécaux (CF) encore appelés coliformes thermo-tolérants, font partie du sous-groupe des coliformes totaux ayant la capacité de fermenter le lactose à une température de 44,5 °C. Ils vivent dans l'intestin humain et animal, mais colonisent d'autres habitats comme les eaux usées et les sources d'eau naturelles (Naidoo et Olaniran, 2014). L'importance de la recherche de ces coliformes c'est que leur présence persistance dans l'environnement est équivalente à la présence des bactéries pathogènes.

I.7.2. Les streptocoques fécaux

Les streptocoques fécaux (SF) sont un groupe traditionnel d'indicateur de la pollution fécale. Les SF se définies comme étant des cocci a Gram positif, avec une catalase négative et non sporulée qui se développent à une température de 35°C. Les pathogènes habitent généralement les intestins humains et animaux, ainsi que des environnements terrestres, et peuvent être présents dans des produits animaux tels que le lait, le fromage et la viande. La détection de leur présence dans une matrice peut constituer une preuve de contamination fécale ancienne.

I.7.3. Les salmonelles

Les salmonelles peuvent être présentes dans tous les divers milieux à savoir dans les aliments produits souillés par de la matière fécale, dans la volaille, le bétail et dans les aliments préparés à partir de ces animaux. De ce fait, les salmonelles se retrouvent facilement dans les eaux usées des abattoirs, dans les stations d'épuration et les stations de traitement de BV(Naidoo & Olaniran, 2014b).

I.7.4. Les coliphages

Les coliphages sont définis comme des virus capables d'infecter les bactéries coliformes comme *E. coli*, ou plus rarement *Shigella* spp ou *Klebsiella* spp. *E. coli* est la bactérie la plus abondante dans l'intestin humain et animal.

En conséquence, les coliphages, des virus non pathogènes, sont les plus abondants dans l'intestin. Cependant, il a été démontré que les coliphages se multiplient très faiblement dans l'environnement en raison de conditions peu favorables. Par conséquent, les coliphages détectés dans l'environnement proviennent principalement de contaminations d'origine fécale et peuvent être utilisés tels quels. Les coliphages font partie du vaste groupe des bactériophages fécaux, des virus capables d'infecter les bactéries entériques. (Hartard, 2017).

On distingue deux types de coliphages : les coliphages somatiques et les coliphages F-spécifiques, aussi connus sous le nom de mâles-spécifiques. Bien que leur morphologie présente des similitudes avec d'autres virus animaux, il est important de noter que les coliphages ne représentent pas de danger pathogène pour les humains et les animaux (**Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2015**)

Les coliphages sont généralement localisés dans l'intestin et sont excrétés dans les matières fécales des humains et d'autres animaux à sang chaud. On les retrouve en concentration élevée dans les eaux usées, atteignant environ 10^7 UFP/ml, et ils sont étudiés depuis de nombreuses années en tant qu'indicateurs viraux potentiels de la contamination fécale.

Pour l'énumération des coliphages, différentes souches hôtes de bactéries sont utilisées, notamment *E.coli* Famp et *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* WG49 (**U.S. EPA, 2015**).

I.7.5. Les œufs d'helminthes

Les concentrations et la diversité des œufs présents sont influencées par divers facteurs, tels que les conditions climatiques, socio-économiques et démographiques. Dans les eaux douces et les eaux usées, la persistance de certains œufs, comme ceux d'*Ascaris*, peut s'étendre de quelques mois à plus d'un an. En ce qui concerne le sort des œufs d'helminthes, plusieurs solutions de traitement à faible coût, comme les lits de séchage plantés, les lits de séchage non plantés, ou le co-compostage des bio-solides, ont démontré une efficacité élevée dans l'inactivation des œufs d'helminthes lors du traitement des boues de vidange.

Selon les études menées par Kengne et al. (2009) au Cameroun, les lits de séchage plantés ont démontré une capacité à réduire la concentration d'œufs d'helminthes de 79 œufs/g de matière sèche (MS) à 4 œufs/g MS après une période de charge de six mois, suivie d'une période de repos supplémentaire de six mois. Au cours de cette période de repos, la teneur en matière sèche des bio-solides a augmenté de 51 à 77 pour cent, cependant, les bio-solides n'étaient pas entièrement assainis après cette période de stockage, ne répondant pas entièrement à la directive de l'OMS fixant une limite d'un œuf/g MS pour des pratiques agricoles sans risque (OMS, 2006).

En conséquence, avant de procéder à l'épandage direct sur les sols, il pourrait être nécessaire d'opter pour une période de stockage supplémentaire, protégée contre les précipitations, d'au moins un mois, ou d'envisager un autre traitement. Les travaux de Sanguinetti et al. menés en Argentine en 2005 ont démontré une diminution significative de la viabilité des œufs d'*Ascaris* avec une réduction de l'humidité à moins de 40% dans les lits de séchage non plantés. Ces résultats suggèrent que le taux d'assainissement des bio-solides est étroitement lié au degré de déshydratation.

I.8. Caractéristiques et composition des boues séchées

La composition exacte des boues séchées dépend de la composition des BV brutes et de l'efficacité du traitement.

♦ La nature des boues

Une fois que les boues sont sorties du système de traitement, elles possèdent une concentration en matière sèche (MS) variable. Cette teneur en matière sèche est définie par la siccité des boues :

- Les boues liquides : 1 à 10 % de siccité ;
- Les boues pâteuses : 10 à 30 % de siccité ;

- Les boues solides : 30 à 90 % de siccité ;
- Les boues sèches : Plus de 90 % de siccité.

♦ La composition physique des boues séchées

La connaissance de la composition détaillée des boues séchées s'appuie sur la méthode MODECOM adaptée aux boues (Mode de Caractérisation des Ordures Ménagères, 1993) développé par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) dont les familles spécifiques de déchets sont : Putrescibles (déchets verts, biodégradables, restes alimentaires, boues ,...), Papiers, Cartons, Complexes, Textiles, Textiles sanitaires (couches, coton hygiénique), Plastiques, Combustibles non Classés (bois, caoutchouc), Verre, Métaux, Incombustibles non classés (pierres et gravats) et les Déchets Spéciaux (piles, seringues, films photographiques et radiographiques).

♦ La composition chimique des boues séchées

Selon l'étude de Benoit (2016) à la STBV de Zagtoui, les analyses des paramètres physico-chimiques des boues séchées donnent des valeurs extrêmement variables. Le tableau ci-dessous appuie le propos. Mais selon la norme NFU44095 sur les amendements organiques - composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux, les pourcentages en MS et MO pour les boues séchées doivent être respectivement de l'ordre supérieur à 50% et à 30%.

Tableau VI: Statistiques et normes des caractéristiques physico-chimiques des boues séchées

Paramètres	n	Minimum	Maximum	Moyenne	Normes NFU44095
MS (%)	12	67,42	95,93	87,14	>50%
Humidité (%)	12	4,07	32,58	12,86	
pH	12	6,28	7,5	6,61	
Cond (µS/cm)	12	644	3310	1730	
MO (%)	12	33,01	55,03	47,23	
MM (%)	12	44,97	66,99	52,77	>30%

n= nombre d'échantillons analysé.

I.9. La gestion des lixiviats et des boues séchées

En ce qui concerne la valorisation des boues de vidange, il est crucial de déterminer quels composants peuvent potentiellement affecter la santé humaine et l'environnement. Les germes pathogènes et les métaux lourds sont particulièrement importants à prendre en compte. Parallèlement, les facteurs sociaux, tels que l'acceptation de l'utilisation des produits issus du traitement des boues de vidange et la demande du marché, jouent un rôle essentiel. Ces éléments

sont essentiels pour garantir l'adhésion à des pratiques de valorisation appropriées (Kengne et al., 2009).

I.10. La réutilisation des boues séchées dans le monde

À la fin des traitements des boues, deux choix se présentent : l'élimination ou la valorisation. L'élimination, consistant à déposer les boues en décharge, est progressivement abandonnée dans de nombreux pays en raison du caractère organique des boues. Une autre pratique d'élimination est l'envoi des boues dans un centre d'incinération sans récupération de la chaleur produite.

Concernant la valorisation, deux principales voies sont suivies : la valorisation en agriculture et foresterie, par épandage direct ou après compostage, et la valorisation énergétique. Dans cette dernière option, les boues peuvent être utilisées comme biocombustible, comme c'est le cas lors de l'incinération, permettant ainsi la production de chaleur et/ou d'électricité (Arisily T.A.A., al., 2019).

Diverses options de gestion sont utilisées dans le monde pour traiter les résidus d'épuration. Le choix des options de gestion, ainsi que le nombre de facteurs à prendre en compte pour chacune d'entre elles, dépendent de la qualité et de la quantité des résidus d'épuration. Une compréhension approfondie du processus de production et des possibilités d'utilisation des résidus d'épuration est cruciale pour aider les producteurs de ces résidus et/ou les organismes de régulation à choisir la meilleure option de valorisation.

Les domaines de réutilisation des boues séchées comprennent la foresterie, l'agriculture, la restauration des sites miniers, la conception de produits à valeur ajoutée et l'utilisation dans la production d'énergie. Pour le cas spécifique, des boues à l'état solide (lit de séchage, filtre-pressé) permettent un stockage en tas et sont épandables avec des épandeurs à fumier habituels. Les boues doivent être épandues selon la bonne pratique agricole, car les quantités de boues à apporter dépendent essentiellement des besoins du sol et des cultures. La limitation de l'épandage agricole peut provenir :

- du risque d'odeurs se dégageant de boues insuffisamment stabilisées ;
- des risques bactériologiques, qui ne doivent cependant pas être surestimés, car l'action microbienne du sol est importante ;
- de la contamination des boues par des métaux lourds (Zn, Cd, Cu, Pb, Ni, etc.). Ce risque n'est à craindre que pour les boues des zones fortement urbanisées (ruissellement) et industrialisées.

L'épandage agricole des boues est soumis à un certain nombre de contraintes, le plus souvent le manque de débouchés des boues organiques s'explique par des raisons d'hygiène publique

et de distribution en terrain agricole et par le manque d'intérêt des cultivateurs pour un produit moins facile à utiliser et de moindre valeur par rapport aux engrais chimiques à forte teneur en azote et phosphore. Pour pouvoir susciter l'intérêt des utilisateurs, il est indispensable de mettre ces boues sous une forme plus appropriée qui facilite leur mise en place (Chakraoui, 2013).

I.11. La réutilisation des boues séchées au Burkina Faso

Au Burkina Faso, la mise en service des différentes STBV ont générées d'énormes quantité de boues séchées au cours du traitement des BV. A leurs conceptions selon le rapport d'étude de faisabilité de l'Agence Française de Développement/Eau et Assainissement pour l'Afrique (AFD/EAA), il était question :

- qu'après minéralisation des boues, elles seront mises à disposition des agriculteurs qui expriment une demande pour en obtenir. Le solde de boues qui n'aura pas été remis aux agriculteurs sera transporté en décharge afin de libérer, si nécessaire, de l'espace de stockage ;
- En période d'hivernage, des mesures adéquates doivent être prises afin d'éviter la réhumidification et le lessivage des stocks de boues ;
- Les boues excédentaires devront être évacuées en décharge (p.ex. au Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Polesgo) au plus tard au début de l'hivernage afin de libérer dans le hangar suffisamment de volume pour le stockage des boues de séchage devant être retirées des lits durant l'hivernage ;
- En cas de mise en service de la STBV avant la construction du hangar (phase I), les boues non reprises par des agriculteurs devront être évacuées depuis les lits directement vers la décharge.

De nos jours, seule la STBV de Kossodo procède à une valorisation des boues épaissies en biogaz mais les digestats se retrouvent aussi stocker avec les boues séchées (EDE/EAA, 2014).

I.12. Les voies "d'avenir" pour la gestion des boues déshydratées

Les technologies suivantes la pyrolyse, la gazéification, l'oxydation par voie humide et la combustion regroupent les procédés dits « d'avenir ». Elles sont généralement de types thermochimiques (Emilie JARDE, 2002).

I.12.1. La pyrolyse (ou thermolyse)

Le procédé se base sur la dégradation de la matière organique par haute température comprise entre 500 à 900°C et en absence d'oxygène (Rumphorst & Ringel, 1994). Il se différencie de l'incinération et de la gazéification car aucune réaction d'oxydation avec la matière n'a lieu, mais une simple décomposition. Ce procédé permet de réduire de façon significative le volume des fumées engendrées et de produire moins d'éléments volatils nuisibles. La pyrolyse ou thermolyse génère essentiellement deux sous-produits dont les proportions varient avec les conditions de l'opération et les caractéristiques du déchet ou de la boue à traiter. Ces sous-produits sont :

- de la matière minérale ou résidu carboné appelé « char », et une partie du carbone, appelé carbone fixe. Ce résidu carboné concentre les ETM à l'exception du mercure et du cadmium. Ce résidu sera évacué dans des décharges ou valorisé comme remblai (Caballero et al., 1997).
- du gaz de pyrolyse, constitué de deux fractions. Une fraction condensable qui se compose de vapeur d'eau et de goudron volatile. Et une autre fraction dite non condensable qui sera composée essentiellement de CH₄, CO, H₂ et CO₂. L'importance de ce gaz, est qu'il est combustible et permet de valoriser l'énergie contenue dans les boues.

I.12.2. La gazéification

Cette technologie se différencie de la pyrolyse par le fait qu'elle élimine la matière carbonée totalement converti en gaz, à des températures pouvant être comprise entre 800 à 2000°C. Ce procédé s'opère sans production de phases liquides ni de phases solides, mais génère des cendres comme sous-produits. La gazéification est un procédé endothermique demandant un important apport de chaleur. En effet, c'est une combustion partielle du matériau initial qui se réalise avec l'air ou l'oxygène.

I.12.3. L'oxydation par voie humide

L'oxydation par voie humide est apparue dès les années 60 aux USA puis s'est développé en France par la société **Degrémont et Granit Technologies**. Elle est semblable à l'incinération, sauf que c'est une oxydation de la matière organique en milieu liquide, avec de l'air ou de l'oxygène pur. A la fin de l'opération, un résidu minéral est obtenu à hauteur de 30 à 50 % de la matière sèche rentrante plus du CO₂ et un liquide. Le liquide sera traité avec le percolât alors que le résidu solide sera éliminé en décharge.

I.13. Cadre législatif et réglementaire en matière d'assainissement des eaux usées et des excréta au BF

Le secteur de l'assainissement des eaux usées et excréta est régi par un ensemble de loi et des directives internationales dont les plus importants textes et leurs décrets d'application sont les suivants :

- **la Constitution du 2 juin 1991** au Burkina Faso marque sa reconnaissance et la nécessité de préserver l'environnement à travers des dispositions de son préambule et en son article 29 ;
- **la loi n° 006-2013/AN** portant code de l'Environnement au Burkina Faso fixe le cadre institutionnel de la protection de l'Environnement et donne une définition des déchets urbains et des déchets industriels, avant de donner une série de mesures sur ces deux types de déchets ;
- **la loi n° 022-2005/AN** portant code de l'Hygiène publique au Burkina Faso contribue à la normalisation de la gestion des eaux usées, des excréta et partiellement des eaux pluviales dans les agglomérations ;
- **la loi n° 055-2004/AN** du 23 décembre 2004, portant code général des collectivités territoriales au Burkina Faso stipule à son article 89 que la commune urbaine et la commune rurale reçoivent les compétences en matière d'assainissement, de lutte contre l'insalubrité, les pollutions et les nuisances.
- **le décret n°98-323/PRES/PM/MEE/MATS/MIHU/MS/MTT** du 28 juillet 1998 portant réglementation de la collecte, du stockage, du transport, du traitement et de l'élimination des déchets urbains stipule à son **Article 08** que : « chaque collectivité décentralisée organise sur le territoire relevant de sa compétence, la collecte et l'élimination des déchets urbains » ;
- **Le décret n°2001-185/PRES/PM/MEE** du **07 mai 2001** portant fixation des normes de rejets des polluants dans l'air, l'eau et le sol ;
- **la loi 055-2004/AN du 21 décembre 2004** portant Code Général des Collectivités Territoriales (CGCT) confère aux communes la maîtrise d'ouvrage en matière d'eau et assainissement ;

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1. Méthodologie générale de l'étude

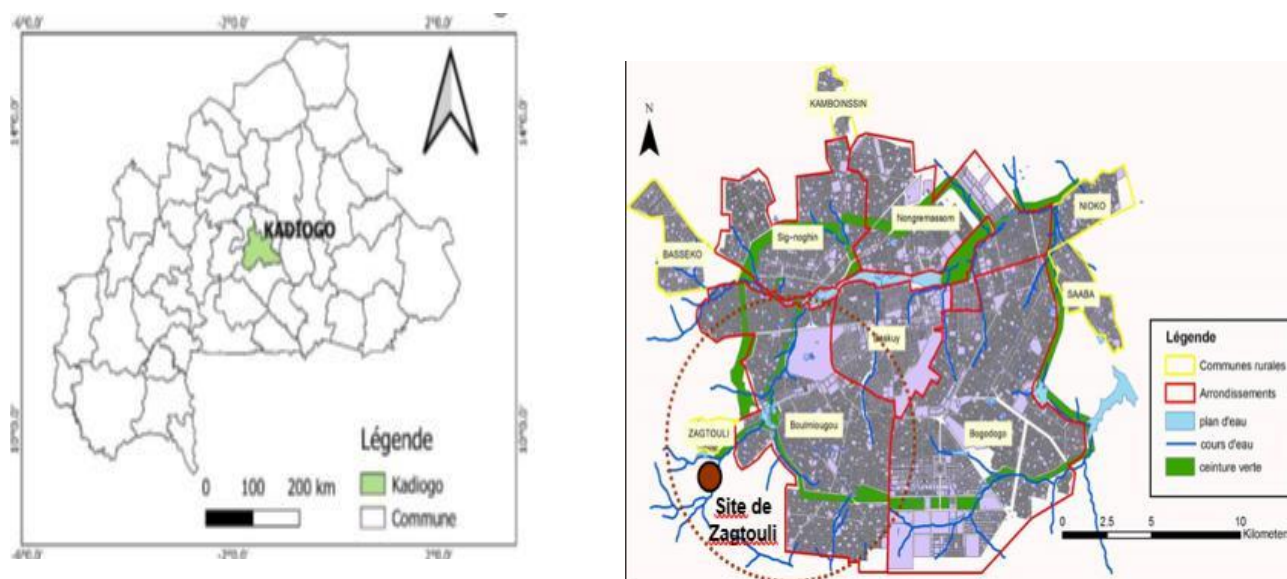
La méthodologie de l'étude adoptée s'articule sur les points suivants :

- **La recherche documentaire :** Cette synthèse bibliographique constitue une revue approfondie des connaissances actuelles sur les boues déshydratées, en couvrant divers aspects tels que la formation des lixiviats, les lixiviats eux-mêmes, ainsi que les normes régissant leur rejet dans l'environnement. De plus, elle explore les différentes voies de réutilisation des boues déshydratées ;
- **Les prélèvements sur le terrain :** Les travaux ont impliqué l'échantillonnage des stocks de boues déshydratées de la station étudiée, la mise en place des réceptacles pour les lixiviats pluviaux, ainsi que la collecte des lixiviats pluviaux ;
- **Les analyses en laboratoire :** Elles ont consisté à analyser les paramètres physico-chimiques, microbiologiques les germes contenus dans les échantillons et à réaliser le test de lixiviat par percolation sur colonne des boues déshydratées au Laboratoire Eaux Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA) de 2iE ;
- **Le traitement des données :** le Pack office, le logiciel Google Earth, ont été les outils utiliser pour la rédaction du document, l'illustration des images et figures, le traitement puis la synthèse des différents résultats. Zotero a permis de réaliser les citations et la génération de la bibliographie.

II.2. Présentation de la zone d'étude

II.2.1. Description de la zone d'étude

La zone d'étude englobe la zone urbaine de Ouagadougou ainsi que quelques communes rurales environnantes. Ouagadougou est positionnée au cœur de la province du Kadiogo, située au centre du Burkina Faso. Sur le plan administratif, la ville est la capitale politique du Burkina Faso et simultanément le chef-lieu de la région du Centre. Elle est délimitée au nord par les communes rurales de Pabré et de Loumbila, à l'est par celle de Saaba, au sud par celles de Koubri et de Komsilga, et enfin à l'ouest par la commune rurale de Tanghin-Dassouri et la commune de Sourgoubila. La figure 4 suivante montre notre zone d'étude avec sa zone d'influence :



Source : EDE/EAA, 2014

Figure 4: Une vue de la zone d'étude et du site de la STBV avec sa zone d'influence.

En outre, la ville de Ouagadougou repose sur des sols peu profonds et pauvres en éléments nutritifs. Le relief présente des faibles pentes et varient entre 0,5 et 1%. Cette zone fait partie du vieil ensemble cristallophyllien d'âge antécambrien, aplani et recouvert d'un manteau assez continu. Les sols sont caractérisés par une faible capacité d'infiltration et de conservation d'eau. Leur perméabilité pour les eaux usées est comprise entre 10 et 40l/j.m² (CREPA, 2004).

D'un point de vue hydrologique, la ville de Ouagadougou est implantée sur un site qualifiable de marécageux, situé dans le bassin versant du Massili. Son climat est tropical, caractérisé par des saisons alternées entre la saison pluvieuse et la saison sèche. Selon le plan d'aménagement, la population totale de la zone urbaine de Ouagadougou devrait être légèrement inférieure à 3 millions d'habitants en 2020, représentant près du triple de la population en 2006 (EDE/EAA, 2014).

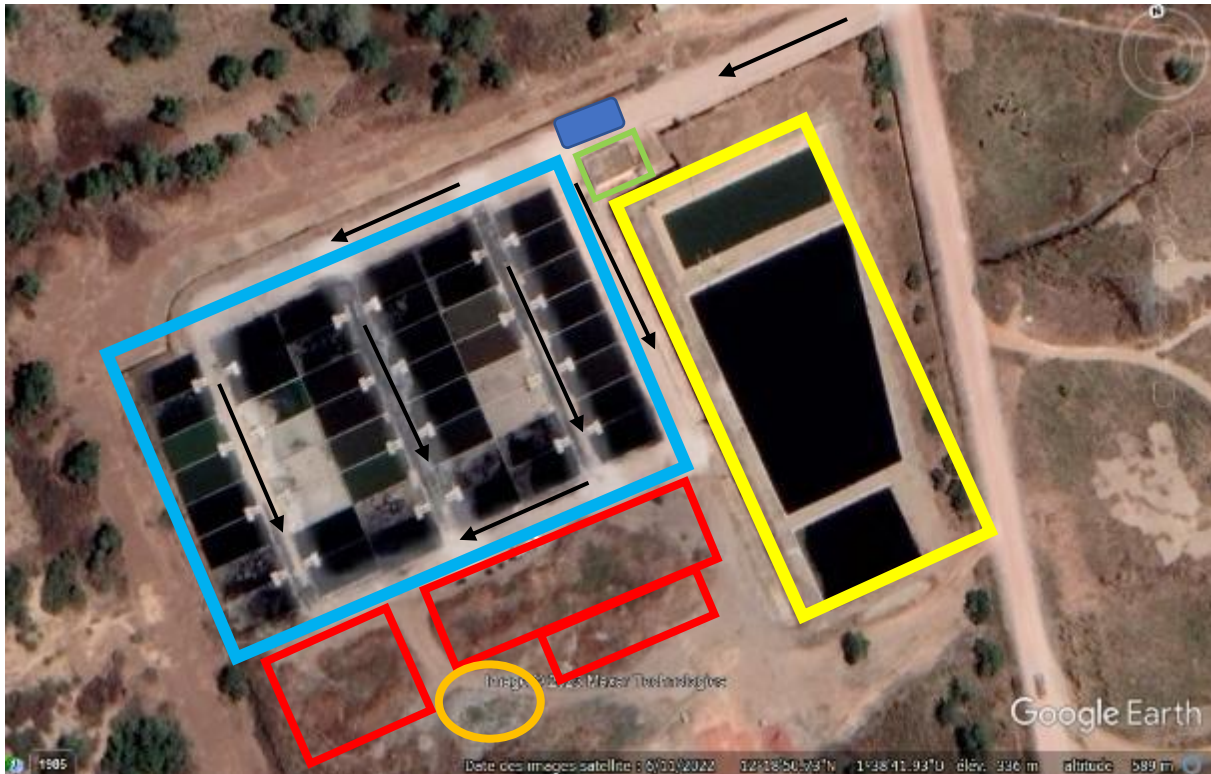
II.2.2. Présentation de la STBV de Zagtouli

L'étude actuelle a été menée à la STBV de Zagtouli, située dans la commune rurale de Zagtouli, une zone péri-urbaine à l'ouest de la capitale. Il s'agit du deuxième site de traitement des boues de vidange de la ville de Ouagadougou, succédant à celui de Kossodo.

La STBV de Zagtouli a été conçue avec des capacités dimensionnées comme suit : $125 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ à l'horizon 2010 et $250 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ à l'horizon 2020. Elle se compose de :

- Une plateforme dotée de 48 ouvrages de dépotage en béton, chacun équipé d'un dégrilleur, permettant un déversement direct des boues dans les lits.
- Un ouvrage de réception alimentant 2 lits alternativement, totalisant ainsi 96 lits pour l'ensemble de la station, dont 48 lits sont actuellement opérationnels.
- Des voies d'accès pour les camions.
- Un pont-bascule permettant de peser les camions de vidange à l'entrée de la station.
- Un bâtiment de service.
- Une aire de stockage permettant l'entreposage des boues sèches en attente d'évacuation.
- Un réseau de collecteurs assurant l'évacuation gravitaire du percolât drainé par les lits vers une STEP à lagunage.

Cette station est dédiée au traitement du percolât par lagunage à microphytes, et les boues doivent subir une minéralisation complémentaire par étalage sur une plateforme exposée au soleil. La figure 6 présente une vue synoptique de la STBV de Zagtouli :



Légende : Lits de séchage non planté Lagunage à microphyte
 Stocks de boues séchées Refus de dégrillage Bureau de pesage
 Pont bascule Voies d'accès

Figure 5: Une vue de la STBV de Zagtoui.

Cependant, nous notons quelques constats observés sur le site :

- une absence de clôture qui est à l'origine de l'intrusion des animaux en divagation venant s'abreuver;
- une absence de piézomètres permettant la surveillance d'éventuelles pollutions des eaux souterraines ;
- une absence d'hangar pour la protection des boues hygiénisées contre les pluies ;
- une irrégularité de vidange des refus de dégrillage qui se remarque par le débordement du bac à ordures disposé à cet effet ;
- un stockage insuffisamment organisé modifiant le paysage ;
- Une absence de collecter de lixiviats issus des boues déshydratées vers le système de lagunage.

Ces constats réduisent l'efficacité de la qualité du traitement des BV et pourraient contribuer à la pollution de l'environnement.

II.3. Echantillonnage

II.3.1. Catégorisation des échantillons

Trois types d'échantillons ont été prise en compte : les lixiviats issus des boues séchées après les précipitations, les boues séchées et les lixiviats issus des boues séchées par percolation sur colonne. La figure 7 présent les images des catégories d'échantillons prélevés :



Figure 6: Images des échantillons prélevés (1 : lixiviats pluviaux ; 2 : bio-solides ; 3 : lixiviats expérimentaux).

II.3.2. Echantillonnage sur le terrain

Pour les boues déshydratées la technique a consisté à des prélèvements ponctuels des boues séchées pour ensuite reconstituer un échantillon composite prélevés par des emballages plastiques.

Les prélèvements de lixiviat ont été réalisés à plusieurs endroits de la décharge au niveau des dépressions du site où des écoulements de lixiviats sont observés. Les collectes ont été effectuées grâce à la confection des dispositifs de collecte en PVC relié à bidon de 20 litres. L'échantillonnages des lixiviats ont été sur la période d'août à octobre 2022 après différents évènements pluvieux.



Figure 7: Dispositif de collecte des lixiviats pluviaux (installation et collecte). Cliché Pascal, septembre 2022.

II.3.3. Méthode expérimentale du test de lixiviation par colonne au laboratoire

En appliquant la norme CEN-14405 sur le test de percolation en colonne tout en modifiant quelques paramètres l'expérimentation a consisté à des essais de percolation sur des boues prisent en état et aussi sur des boues broyées et tamisées ayant une granulométrie inférieure à 4 mm (comme l'indique le protocole). Le dispositif expérimental est composé de trois (03) colonnes, un support, une pompe péristaltique, une bonbonne d'eau distillé et des grilles. Chaque colonne est remplie d'abord par une hauteur de 10 cm de quartz de granulométrie de 5 à 25 mm. Ensuite, au-dessus du quartz, le remplissage de la colonne par un (01) mètre de boues séchées. Enfin le lancement du processus d'approvisionnement en eau distillé en fonction des débits croissants. Les débits retenus pour les essais vont de 50 mL/min à 300 mL/min avec des pas de 50 ml/min.

Pour chaque colonne les lixiviats recueillis sont analysés. La figure ci-dessous illustre le dispositif expérimental.

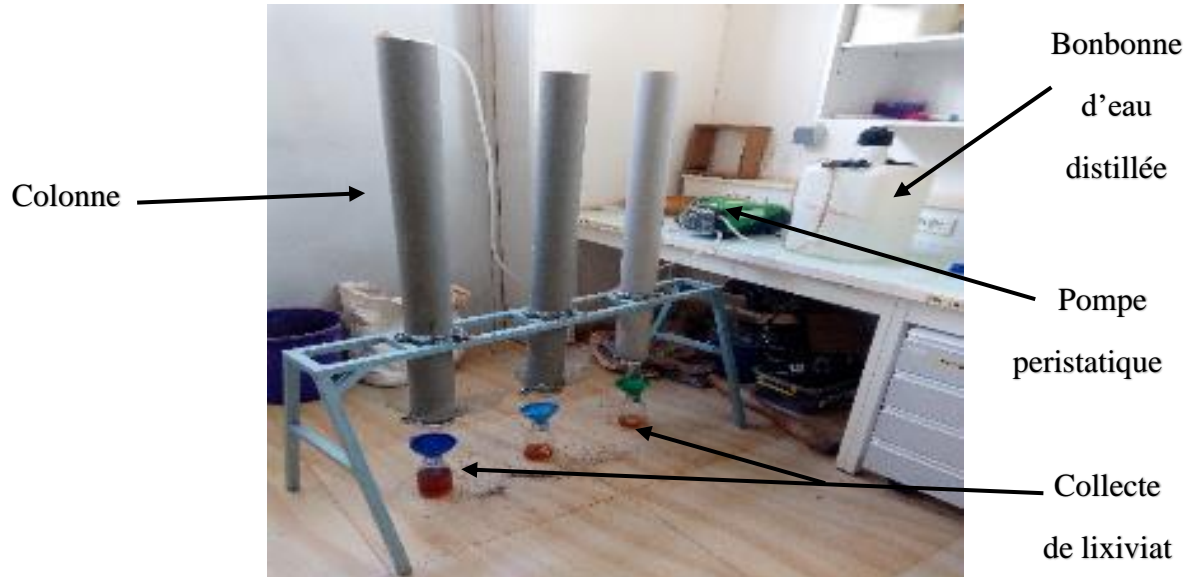
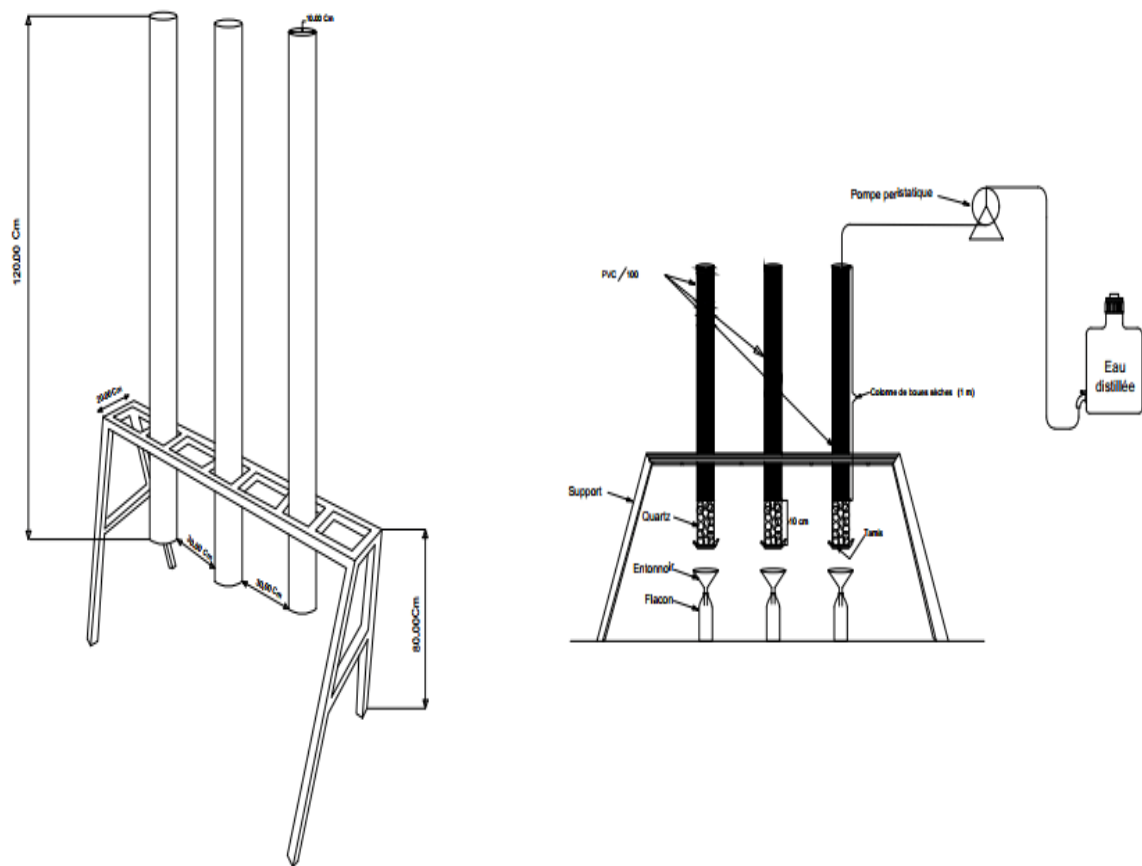


Figure 8: Schéma du dispositif expérimental du test de lixiviation sur colonne.
II.3. Prélèvement, transport et conservation des échantillons

La récolte des échantillons s'est opérée dans des bouteilles en polyéthylène de 500 mL, préalablement lavées à l'acide nitrique et à l'eau distillée puis rincées trois fois avec l'effluent pour les analyses physico-chimiques. Pour les analyses microbiologiques les bouteilles en verre

borosilicaté stériles (la stérilisation à l'autoclave à 121°C et 1 bar pendant 15 minutes) de 500 mL sont utilisées. Les échantillons ont été ensuite transportés dans une glacière à 4°C jusqu'au laboratoire pour les différentes analyses. Les prélèvements des boues sont effectués par des emballages plastiques. Au laboratoire, les échantillons sont conservés également dans des réfrigérateurs à 4°C (RODIER J. al., 2009).

II.4. Analyses au laboratoire

Les analyses ont été réalisées au laboratoire dans les unités de microbiologie et de physico-chimie du Laboratoire Eaux Hydro-Systèmes et Agriculture (LEHSA) de 2iE pour les lixiviats, le test de lixiviation par colonne et les boues séchées.

II.4.1 Méthodes d'analyses des paramètres physico-chimiques

Les paramètres communs analysés pour les lixiviats et les boues séchées sont :

- La température (**T**), le potentiel d'hydrogène (**pH**), la conductivité (**CE**), le potentiel redox (**Eh**), le total des sels dissous (**TDS**) qui indiquent le niveau de minéralisation et de stabilité des lixiviats et des boues. Ils ont été mesurés dès l'arrivée des échantillons au laboratoire ;
- Les Matières sèches (**MS**), les Matières Volatiles Sèches (**MVS**), le Carbone Organique Total (**COT**), la Matière Organique (**MO**), les Matières Minérales (**MM**) et la teneur en eau (**H**), (annexes I et II) ;

Les paramètres chimiques comme les sulfates [SO_4^{2-}], les nitrates [NO_3^-], les nitrites [NO_2^-], les ortho-phosphates [PO_4^{3-}], les fluorures [F^-] et l'ammonium [NH_4^+] ont été déterminés par spectrophotométrie d'absorption moléculaire (**DR3900**) ;

- Les paramètres chimiques tels que le calcium [Ca^{2+}], le magnésium [Mg^{2+}], les bicarbonates [HCO_3^-] et les chlorures [Cl^-] ont été déterminés par **volumétrie** ;
- Les paramètres chimiques tels que le Sodium [Na^+] et le potassium [K^+] ont été mesurés par un **photomètre à flamme** ;
- La demande chimique en oxygène (**DCO**) a subi une minéralisation à 150°C pendant 2 heures et la lecture colorimétrique au DR890 ;
- La demande biologie en oxygène (**DBO**) en 5 jours par la méthode oxitop

Les Eléments Trace Métalliques (**ETM**) tels que le cadmium (**Cd**), le plomb (**Pb**), le zinc (**Zn**), le nickel (**Ni**), le chrome (**Cr**), le cobalt (**Co**), le fer (**Fe**), l'argent (**Ag**), l'aluminium (**Al**), le manganèse (**Mn**), l'arsenic (**As**), et le cuivre (**Cu**) ont été mesurés par la méthode d'analyse par voie humide ICP (**Inducted Coupled Plasma**), c'est-à-dire la spectrophotométrie d'émission optique à plasma.

Le tableau VII indique les paramètres à analyser ainsi que le matériel et les méthodes utilisés.

Tableau VII: Les paramètres des analyses physico-chimiques des lixiviats et des boues séchées.

Paramètres	Matériel	Méthodes
Potentiel d'hydrogène (pH)	Multi-paramètres WTW 3310 set 2	NF T 90-008 (53)
Potentiel Redox (Eh)	Multi-paramètres WTW 3310 set 2	NF EN 27888 (94)
Température (T)	Multi-paramètres WTW 3310 set 2	NF T 90-100
Conductivité (CE)	TetraCon 325	NF EN 27888 (94)
Teneur en eau (H)	Etuve (Mamert 870902)	
Matière en Suspension (MES)	Filtre GFC	AFNOR T90-105 NF T 90-105-2
MS	Dessiccation à l'étuve 105 °C pendant 2 h.	NF ISO 11464, 2006
MVS	Gravimétrie	NF EN 15169 2007
MV	Gravimétrie	NF ISO 11464, 2006
nitrite [NO ₂ ⁻]	Spectrophotométrie/Colorimétrie automatisée (d'absorption moléculaire à l'aide de la DR3900)	8507 HACH
nitrate [NO ₃ ⁻]		8039 HACH
ammonium [NH ₄ ⁺]		8155 HACH
[SO ₄ ²⁻]		8051 HACH
[PO ₄ ³⁻]		8048 HACH
PT([PO ₄ ³⁻])		8114 HACH
[F ⁻]		8029 HACH
Fe ²⁺		8146 HACH
Azote Kjeldhal (NTK)	Minéralisateur (BÜCHI Speed Digesteur K-436), Distillateur (BÜCHI Distillation Unit K-355) et Dispositif de titration	Méthode Kjeldahl Kjeldahl, J. (1883)
[Ca ²⁺]	Burette, Erlenmeyer	NF T 90-003 (84)
[Mg ²⁺]		NF T 90-003 (84)
[HCO ₃ ⁻]		NF T 90-003 (84)
[Cl ⁻]		NF T 90-014 (52)
[Na ⁺], [K ⁺]	Photométrie à flamme de type JENWAY PFPT	
ETM (Fe, Zn, Al, As, Mn, Pb, As, Cu, Cr, Ni, Co, Ag)	Spectrophotométrie d'émission optique à plasma par voie humide (ICP-EOP)	NF EN 13650, ou méthode de l'Eau Régale

DCO	Standard methods 18 ^e édition Minéralisation/Spectrométrie	NF T 90-101
DBO₅	Standard methods 18 ^e édition Minéralisation/Spectrométrie	NF T 90-103 ISO

II.4.2. Méthodes d'analyses des paramètres microbiologiques

Tous les matrices des STBV contiennent des germes à des degrés variables en fonction de la technique du traitement appliqué et de l'efficacité du traitement. Le traitement sur Lit de Séchage Non Plant (LSNP) permet une répartition des germes en fonction de leur taille selon une étude réalisé par Benoît en 2016.

Etant donné que la matière première est de la matière fécale, les germes recherchés seront celles présente dans celle-ci. Le tableau VIII résume les méthodes et les normes utilisées.

Tableau VIII: Les paramètres des analyses microbiologiques des boues sèches et des lixiviats.

Paramètres	Unités	Milieu	Incubateur	Méthodes	Références/Normes
Coliformes fécaux	UFC/100 ml	Chromocult Coliformes Agar ES	44,5°C ±0,5 °C : 24 heures	Ensemencement en profondeur sur milieu solide	APHA-AWWA (1998) 9215A
Coliformes totaux			37°C : 24 heures		
Streptocoques fécaux		Chromocult Enterococci Agar			
Salmonelles (Salmonella)	Bacteries/100 ml	Rappaport Vassiliadis Broth & XLD	37°C : 48H	Nombre le plus probable (NPP)	Norme NFU 44-051
Coliphages	UFP/100ml	Tryptic Soy Agar (TSA)	37°C : 24H	Ensemencement en profondeur sur milieu solide	Méthode EPA 1602 SAL
Parasites	Nombre Œufs/litre	Réactifs : Tampon acéto-acétique ; éther éthylique ; sulfate de zinc	-	Décantation / Concentration	WHO 1996 (Bailenger modifiée)

II.4.3. Méthodes de calcul des paramètres physico-chimiques

II.4.3.1. Détermination de la MS, du H, de la MO et de la MM

Selon les protocoles d'analyses en annexes I et II permettent d'obtenir les valeurs des paramètres M_0 , M_1 , M_2 et M_3

$$MS(\%) = \left(\frac{M_2 - M_0}{M_1 - M_0} \right) * 100$$

$$H(\%) = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} \right) * 100$$

$$MO = \left(\frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_0} \right) * 100$$

$$MM = \left(\frac{M_3 - M_0}{M_2 - M_0} \right) * 100$$

Avec :

MS : représente la teneur en matière sèche de l'échantillon de boue en pourcentage

H correspond au taux d'humidité des boues en pourcentage ;

MO : représente la teneur en matière sèches volatiles ou matière organique de l'échantillon de boues, en pourcentage ;

MM : représente la teneur en matière minérale de l'échantillon de boues, en pourcentage ;

M_0 : est la masse initiale du creuset vide en gramme ;

M_1 : est la masse du creuset contenant l'échantillon de boues en gramme ;

M_2 : est la masse du creuset avec la matière sèche de l'échantillon après étuve (séchage à 105 °C) ; en gramme ;

M_3 : est la masse du creuset contenant la matière calcinée de l'échantillon de boues après calcination à 550°C, en gramme.

II.4.4. Méthodes de calcul des paramètres microbiologiques

II.4.4.1. Détermination de la concentration des indicateurs de contamination fécale (CF et SF)

La détermination de la concentration des différents indicateurs de contamination fécale et des pathogènes a été calculée à partir de la formule ci-après :

Pour les indicateurs de contamination fécales CF et SF

$$[\text{CF}] \text{ ou } [\text{SF}] = \frac{n}{V_{\text{inoculée}}} * Fd * 100$$

[CF ou SF ou CT] en UFC/100 ml

Avec $n \in [30 ; 300]$: nombre de colonies ;

$V_{\text{inoculée}}$: le volume d'échantillon inoculé (1mL) et Fd : facteur de dilution.

Pour les boues déshydratées, la détermination des CF ou SF se fait à partir de la formule suivante :

$$[\text{CF}] \text{ ou } [\text{SF}] = \frac{n}{m}$$

Avec :

CF ou SF exprimé en **UFC/gMB** (MB : matière brute c'est dire poids humide de l'échantillon) ;

Et n : nombre de colonie compté, m : masse de l'échantillon brute en g ;

Ou bien

$$[\text{CF}] \text{ ou } [\text{SF}] = \frac{n}{m} \times 100$$

Avec :

CF ou SF exprimé en **UFC/100gMB** (MB : matière brute c'est dire poids humide de l'échantillon) ;

Et n : nombre de colonie compté, m : masse de l'échantillon brute en g ;

La masse de l'échantillon analysée est déterminée de la façon suivante : 1 ml de dilution de 1 g d'échantillon dans 9 ml de solution de Ringer correspond à 0,1 g d'échantillon analysé. Les dilutions en séries effectuées par la suite correspondant à 0,01 g ; 0,001 g ; 0,0001 ; etc. d'échantillon analysé.

II.4.3.2. Détermination de la concentration en salmonelles

Pour la détermination des valeurs de salmonelles, il faut se servir de la table de MacGray et dans le cas précis nous avons utilisé la table à trois dilutions successives. Cela permet d'avoir la concentration en microorganismes par volume par la formule ci-dessous :

$$[S] = \frac{npp}{V_{inoculée}} * Fd * 100$$

NPP : valeur obtenue à partir de la table de MacGray

$V_{inoculée}$: le volume d'échantillon inoculé (1mL) et Fd : facteur de dilution.

II.4.3.3. Détermination de la concentration des coliphages

La détermination de la concentration en coliphages se fait à partir de la formule ci-dessous :

$$[Coliphages] = \frac{n}{V_{inoculé}} * Fd ;$$

[Coliphages] en UFP/100ml

$n \in [30 ; 300]$; $V_{inoculé} = 100 \text{ ml}$

II.4.3.4. Détermination de la concentration des parasites

La formule ci-dessous a permis de déterminer le nombre d'œufs par litre d'échantillon décanté.

$$N = \frac{A * X}{P * V}$$

N représente le nombre d'œufs par litre d'échantillon ;

A est le nombre moyen d'œufs comptés sur la lame à partir des trois essais ;

X est le volume du produit final en millilitres (ml) ;

P est le volume de la lame en millilitres (ml) ;

V est le volume d'échantillon brut en litres.

Chapitre III : Résultats et discussions

Cette partie consiste à présenter les résultats obtenus des analyses et à les comparer à différentes études antérieures et aux normes nationales ou internationales.

III.1. Les paramètres physico-chimiques des lixiviats

Avant tout propos, il a été nécessaire de caractériser la matrice « boues déshydratées » avant de réaliser la caractérisation physico-chimiques et microbiologiques des différents types de lixiviats (lixiviats pluviaux et les lixiviats expérimentaux).

III.1.1. Composition physico-chimique des boues séchées

III.1.1.1. Estimation des quantités des boues séchées

A l'aide d'un décimètre, nous avons mesuré les dimensions des différents tas de boues séchées au niveau des STBV. En utilisant une éprouvette de 100 mL nous avons effectué une estimation de la masse de boues séchées correspondante. Ainsi, il est estimé à 0,08 Kg de boues pour 100 mL. Cela a permis de dresser le tableau suivant :

Tableau IX: Estimation des quantités des boues séchées des STBV de Ouagadougou.

Estimation des quantités de boues sèches des STBV de Ouagadougou.						
Dimensions des stockages des boues séchées	Station de Zagtoui		Station de Kossodo		Station de Sourgoubila	Recommandation de stockage de l'EAA
	Tas 1	Tas 2	Tas 1	Tas 2	Tas	
Longueur (m)	65,7	30,64	91,93	89,2	82,54	Les tas de stockage doivent être compris entre 0,5 m pendant le 1er mois jusqu' à 2,5 m
Largeur (m)	28,8	23,1	20,44	26,63	6,69	
Hauteur (m)	6,22	4,46	2,2	0,79	2,1	
Volume boues (m ³)	14925,95184		6010,47108		1159,60446	
Masse de boues séchées (Kg)	11 940 761,47		4 808 376,864		927 683,568	

A l'issu de l'estimation des boues, nous retenons que la STBV de Zagtoui est de loin le plus grand producteur de bio-solides avec environ 12 000 tonnes de boues séchées stockées sur le site. Dans l'ensemble, la norme de stockage des boues n'est pas respectée. En plus, l'absence de mise décharge des boues et des refus modifient énormément le paysage de la STBV.

III.1.1.2. Composition physique des boues séchées

En partant de la caractérisation selon le Mode de Caractérisation des Ordures Ménagères (MODECOM) sur les ordures ménagères avec une adaptation, en considérant la composition en matière organiques et inorganiques comme étant de la matière putrescible. Ainsi, cela a permis d'élaborer le tableau ci-dessous :

Tableau X: Composition physique des boues solides stockés de Zagtoui.

Composition physique des boues (en pourcentage massique)	n	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Rang
Putrescibles (Boues séchées)	10	0	99,032	97,74327	1,092	1^{er}
INC (Cailloux, coquillage, ...)	10	0	1,9054	1,20167	0,503	2^{ème}
Plastiques	10	0	1,4206	0,40132	0,387	3^{ème}
CNC (Bois, cuir, ...)	10	95,7	0,293	0,03468	0,092	4^{ème}
Textiles sanitaires	10	0	1,7	0,33	0,542	5^{ème}
Textiles	10	0,5609	0,7	0,24562	0,292	6^{ème}
Métaux	10	0	0,2343	0,02343	0,074	7^{ème}
Verres	10	0	0,0868	0,01621	0,034	8^{ème}
Déchets spéciaux	10	0	0,038	0,0038	0,012	9^{ème}

INC : Incombustible non classé ; CNC : Combustible classé et n : nombre

Les résultats de la composition physique montrent que les boues sont essentiellement composées de matières putrescibles avec plus de 97%. La présence des textiles sanitaires, des plastiques, des verres, des métaux, des déchets spéciaux, ... témoignent de la mauvaise utilisation des ouvrages d'assainissement non collectif par les ménages. Cette présence influe sur l'efficacité du prétraitement des BV dans les fosses et aussi au traitement au niveau des STBV. Cela se remarque par la persistance de leur présence dans les boues déshydratées en fin de traitement. Cependant, la présence de plastiques et d'autres déchets (spéciaux et textiles sanitaires) rend la valorisation en compostage une tâche pas du tout aisée. De cette composition, il s'avère nécessaire de privilégier les filières de réutilisation des boues hygiénisées comme le co-compostage ou les autres filières de valorisation (pyrolyse, cimenterie, ...) La figure 10 présente la composition massique en pourcentage des boues séchées selon la caractérisation de MODECOM. Elle illustre les chiffres du tableau X.

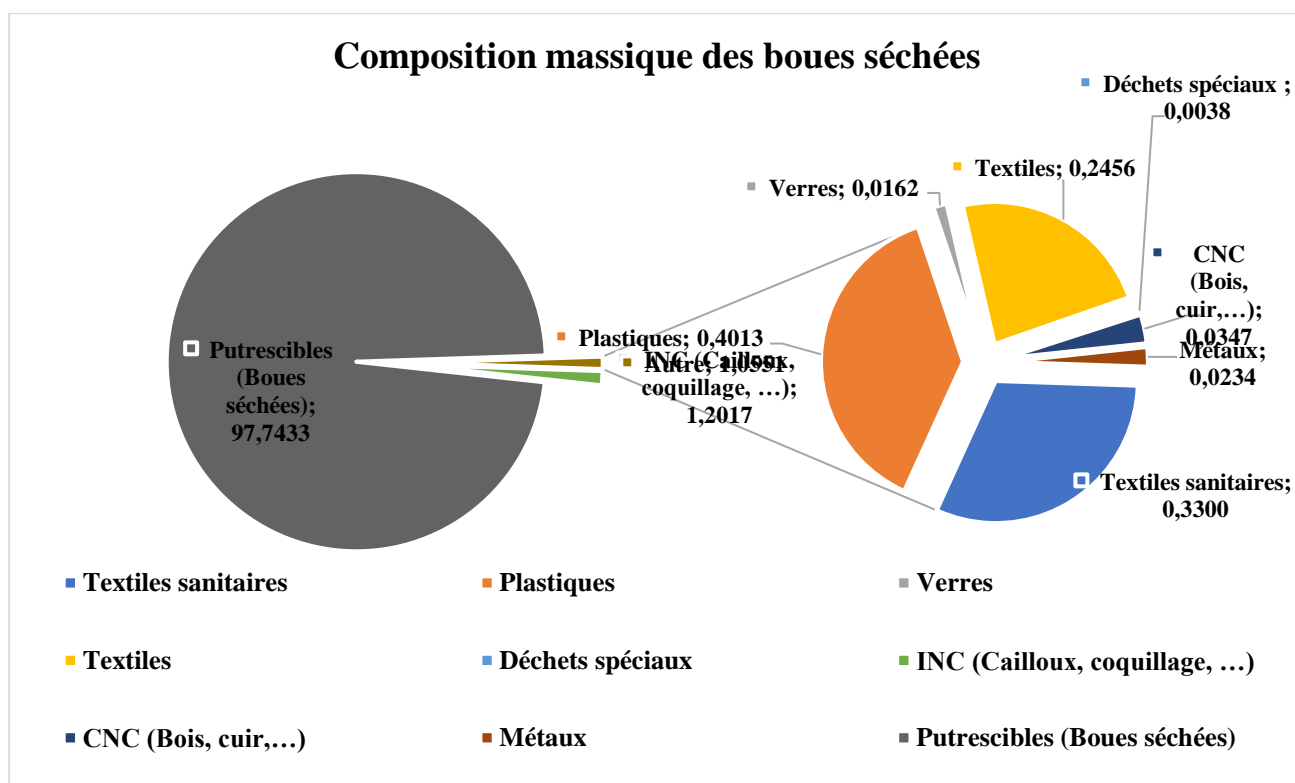


Figure 9 : Composition massique en pourcentage des boues séchées.

La part des indésirables bien que faible n'est pas négligeable pour une éventuelle valorisation. Ces indésirables sont pour la plupart non biodégradable. Pour une valorisation en compostage, il faut obligatoirement les retirer avant le processus par contre pour les voies d'avenir de réutilisation des boues séchées cela permettra d'optimiser les résultats. Par exemple les plastiques dans la pyrolyse permettraient d'avoir une importante énergie.

III.1.1.3. Composition chimique des boues séchées

Le tableau XI suivant présente les statistiques des compositions chimiques des boues séchées de la STBV de Zagtoui. Les dix (10) échantillons prélevés ont présenté une moyenne en pourcentage de MS respectant la norme NFU 44095. Alors que la moyenne en MO est presque proche de la norme. Cette différence pourrait avoir une insuffisance en matière de compostage.

Tableau XI: La composition physico-chimique des boues déshydratées (n=10).

Bio-solides	n	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type	Normes NFU44095 et recommandations EAA
MS (%)	10	61,33	68,01	74,72	3,9	> 50%
pH (*)	10	6,35	6,878	7,86	0,58	
CE (µS/cm)	10	1889	2133,8	2580	314,25	
Eh (mV)	10	1,6	53,06	82,4	30,8	
H (%)	10	25,28	31,99	38,67	3,9	
MO (%)	10	20,38	29,55	38,96	5,76	>30% et 45 à 70% (EAA)
COT (%)	10	10,19	14,775	19,48	2,88	
MM (%)	10	61,04	70,45	79,62	5,76	50 à 55 % (EAA)

n : Nombre d'échantillons analysés.

Nous constatons que les bio-solides ont un pH proche de la neutralité ou légèrement basique. Ces valeurs de pH sont bien comprises dans l'intervalle des normes d'hygiénisation des bio-solides (6,5 et 9,0). Quant à la conductivité avec une moyenne 2 133,8 µS/cm indique que les bio-solides ont une minéralisation élevée (l'intervalle de minéralisation élevé : Conductivité >1000 µS/cm ; annexe VII). Selon les objectifs de traitement de la phase solide des boues de EDE/EAA, les proportions en MM des boues séchées sont comprises en **50 à 55% de MS**. La composition moyenne en pourcentage de MM des boues déshydratées de notre étude est de **70,45% MS** ce qui traduit un degré de minéralisation poussée. Avec une composition en matières organiques de **29,55% MS**. Pour le potentiel redox, les valeurs sont toutes positives et impliquent les bio-solides forment un milieu oxydant fort. Cela a pour avantages d'apporter des électrons pour l'oxydation des composées afin d'assurer l'hygiénisation.

Les variations constatées pourraient s'expliquer par un fort lessivage des boues lors des précipitations avec la durée de stockage.

III.1.1.4. Compositions microbiologiques des boues séchées

Le tableau XII ci-dessous donne les valeurs des germes microbiologiques contenus dans les boues déshydratées.

Tableau XII: Les paramètres microbiologiques et parasitologiques des boues séchées.

Paramètres	Unités	n	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Norme et recommandations EAA
CF	UFC/g MB	10	$6,12.10^{+2}$	$1,59.10^{+6}$	$3,26.10^{+5}$	$6,20.10^{+5}$	10^4 UFC/g MB (NFU44-095)
SF	UFC/g MB	10	$2,38.10^{+3}$	$8,50.10^{+3}$	$4,03.10^{+3}$	$1,70.10^{+3}$	10^5 UFC/g MB (NFU44-095)
Salmonelles	NPP/g MB	10	$6,26.10^{+2}$	$6,32.10^{+5}$	$1,88.10^{+5}$	$2,62.10^{+5}$	0 UFC/g MB (NFU44-095)
Œufs d'helminthes	Nombre d'œufs/g MB	10	$6,80.10^{+2}$	$4,32.10^{+3}$	$1,75.10^{+3}$	$1,05.10^{+3}$	3 – 8 œufs/g MB (EAA)
Coliphages	UFP/g MB	10	$5,78.10^{+3}$	$5,94.10^{+4}$	$2,85.10^{+4}$	$1,88.10^{+4}$	

n : Nombre d'échantillon et MB : Matière brute

La valeur moyenne CF qui est de $3,26.10^5$ UFC/gMB permet de dire que la composition en CF ne respecte pas la norme NFU44-095 qui est 10^4 UFC/g MB. Alors que la présence en SF avec une concentration de $1,7.10^3$ UFC/gMB a une valeur moyenne en dessous la norme. En ce qui concerne, les œufs d'helminthes qui sont les germes les plus résistants, la valeur moyenne de $1,7.10^3$ œufs/gMB est très largement au-dessus de la valeur critique de 3-8 œufs d'helminthes/g MB pour les objectifs de traitement de la phase solide selon le cahier de charge de l'EDE/EAA. La teneur en salmonelles ($1,88.10^5$ UFC/g MB) ne respecte pas la norme NFU44-095 qui est de 0 UFC/gMB.

Les teneurs élevées de germes après le traitement pourraient s'expliquer par d'abord par une insuffisance dans l'usage des ouvrages d'assainissement non collectif par les ménages. Ensuite une insuffisance du traitement des BV sur les lits de séchage par exemple le dégrillage, le temps de séjour ou bien un ensoleillement insuffisant. Enfin une phase d'hygiénisation insuffisante. D'où la nécessité de remettre en cause l'étape d'hygiénisation des boues. Par conséquent, il faut un étalage des boues déshydratées à faible épaisseur durant un bon mois d'ensoleillement pour réduire les germes de façon drastique et pouvoir se conformer à la norme et aux recommandations.

III.1.1.5. Concentration des ETM dans les boues déshydratées

Le tableau ci-dessous donne les statistiques des concentrations des ETM retrouvés dans les boues séchées avec la norme nationale de rejet dans le milieu naturel.

Tableau XIII: La concentration en ($\mu\text{g/gMS}$) des ETM des boues séchées (n=10).

Echantillon		Boues séchées			
Paramètres	Unité	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type
Ag	$\mu\text{g.gMS-1}$	1	1,5	1,75	0,43
Al	$\mu\text{g.gMS-1}$	3975,5	4821,58	5314	736,01
As	$\mu\text{g.gMS-1}$	0	0	0	0
Cd	$\mu\text{g.gMS-1}$	0	0	0	0
Co	$\mu\text{g.gMS-1}$	1,5	2,08	2,5	0,52
Ni	$\mu\text{g.gMS-1}$	6,75	8,83	10,5	1,91
Fe	$\mu\text{g.gMS-1}$	11793,25	13903,5	15504,5	1907,31
Mn	$\mu\text{g.gMS-1}$	335,25	358,75	399,75	35,63
Cu	$\mu\text{g.gMS-1}$	72	93,42	112,25	20,25
Zn	$\mu\text{g.gMS-1}$	609	709,92	808,25	99,65
Cr	$\mu\text{g.gMS-1}$	18,75	20	22,5	2,17
Pb	$\mu\text{g.gMS-1}$	20,5	23,58	25,5	2,70
K	$\mu\text{g.gMS-1}$	292,25	1095,08	1924,5	816,45
Mg	$\mu\text{g.gMS-1}$	869,5	1722	2651	893,21
Ca	$\mu\text{g.gMS-1}$	18650,75	23316,58	25971	4053,50
Na	$\mu\text{g.gMS-1}$	0	0	0	0

Les teneurs moyennes en cations échangeables K^+ , Mg^{2+} dans les boues déshydratées sont respectivement de 1095,08 et 1722 $\mu\text{g/gMS}$ tant dis que les concentrations en métaux évaluées ($\text{Fe} > \text{Al} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Ag}$) sont respectivement de 13903,5 ; 4821,5 ; 709,9 ; 358,7 ; 93,423,6 ; 20 ; 8,8 ; 2,08 ; 1,5 $\mu\text{g/gMS}$. La présence prépondérante du Fe, Al et Zn serait liée aux sources d'apport dominantes de ces métaux dans les boues de vidanges (corrosion des matériaux de construction riches en Fe, Al et les sources d'aliments riches en Zn et les produits cosmétiques). En l'absence de normes nationales sur les teneurs en ETM dans les boues déshydratés aucune comparaison réglementaire ne pourrait être dans ces conditions au plan national.

III.2. Concentration en nutriments des boues déshydratées

Les résultats des analyses en nutriments des lixiviats obtenus sont consignés dans le tableau XIV ci-dessous donnant quelques paramètres chimiques des boues séchées. Ces paramètres permettent d'apprécier le potentiel fertilisant des boues.

Tableau XIV: Les paramètres chimiques des boues séchées.

Le tableau XIV présente les statistiques de la présence des éléments nutritifs présents dans les boues déshydratées.

	Unité	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
NH_4^+	mg.Kg ⁻¹	10	1,15	28,675	64,8	29,22
PO_4^{3-}	mg.Kg ⁻¹	10	0,65	8,455	18,9	8,17
P_2O_5	mg.Kg ⁻¹	10	0,5	4,69	10,4	4,34
NO_3^-	mg.Kg ⁻¹	10	14,5	4120,95	21120	6465,12
N-NO_3^-	mg.Kg ⁻¹	10	3	120,7	245	124,08
NO_2^-	mg.Kg ⁻¹	10	0,0405	0,0589	0,08	0,01
N-NO_2^-	mg.Kg ⁻¹	10	0,0045	0,01235	0,025	0,01
SO_4^{2-}	mg.Kg ⁻¹	10	10	1909,5	6000	2322,36
Fe	mg.Kg ⁻¹	10	0,05	0,24	0,75	0,22

La présence des ions comme contenant l'azote et le phosphore sont essentiels pour la valorisation en compost car ce sont les principaux éléments dont les végétaux ont besoin. Leurs présences dans les boues déshydratées ont une valeur importante aux boues mais le ruissellement de ces éléments dans les cours d'eau entraîne une eutrophisation donc une pollution des cours d'eau.

III.2.1. Les paramètres physiques des lixiviats pluviaux

Le tableau XII ci-dessous donne les valeurs de la caractérisation des paramètres physiques des lixiviats pluviaux avec quelques normes nationales.

Tableau XV: Les paramètres physiques des lixiviats pluviaux.

	Unité	n	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Norme
T	°C	11	26,6	31,2	28,01	1,55	18 - 40
pH	*	11	7,24	8,46	7,99	0,39	6,4 - 10,5
CE	µS/cm	11	5190	16730	10140	4545,25	
Eh	mV	11	-104,3	-102,2	-103,23	0,61	
TDS	g.L ⁻¹	11	5,74	15,66	10,17	5,09	
Sal	g.L ⁻¹	11	3,1	9,1	5,75	3,06	

n : nombre d'échantillon ; * : sans unité

La valeur moyenne des températures des lixiviats 28,01°C. Ce paramètre respecte la norme de rejet au BF dont la valeur est comprise entre 18°C et 40°C. Les valeurs de pH varient 7,24 et

8,46 dans la plage basique. La valeur moyenne du pH qui est de 7,99 respecte la norme de rejet comprise entre 6,4 et 10,5. Cependant, cette tendance basique du pH pourrait s'expliquer par l'état du vieillissement du stockage des boues. Au fil du vieillissement d'une décharge, on observe généralement un appauvrissement en composés organiques volatils dans le lixiviât. Cette réduction des composés organiques volatils peut entraîner une augmentation du pH, souvent au-dessus de 7 (Aissaoua -lahmar, 2019).

En ce qui concerne la conductivité, la valeur moyenne est de 10 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ implique les lixiviats ont une minéralisation élevée. La conductivité électrique est une mesure qui permet d'évaluer la quantité de sels dissous dans l'eau. Une conductivité élevée indique une concentration significative de sels dissous, ce qui donne des indications sur le degré de minéralisation de l'eau. Ainsi, une conductivité élevée suggère la présence d'une importante quantité de sels dissous dans l'eau (RODIER J. al., 2009). Au BF il n'y a pas de norme de rejet concernant ce paramètre.

Les valeurs des potentiels redox sont toutes négatives. Ce qu'il signifie que le milieu du lixiviât est un milieu réducteur.

III.2.2. Les paramètres chimiques des lixiviats pluviaux

Les propriétés des lixiviats sont difficiles à déterminer avec précision en raison de leurs variations dans le temps et l'espace (Trebouet et al., 2001). Néanmoins le tableau XVI présente les teneurs analysées de quelques paramètres physico-chimiques des lixiviats pluviaux. Il s'agit des MES qui fluctuent [54 mg.L^{-1} - 1020 mg.L^{-1}] avec une moyenne de $503,93 \text{ mg.L}^{-1}$, des MVS qui varient [12 mg.L^{-1} - 667 mg.L^{-1}] avec une moyenne de $278,54 \text{ mg.L}^{-1}$, des MS de [0,59%-1,59%] comme moyenne 1,02%, des MV qui évoluent dans l'intervalle de [40,75%-67,58%] dont la valeur moyenne est de 42,21%, des DCO se trouvent dans la plage de [$3320 \text{ mgO}_2.\text{L}^{-1}$ - $21900 \text{ mgO}_2.\text{L}^{-1}$] dont la moyenne est de $9853,8 \text{ mgO}_2.\text{L}^{-1}$ également les DBO5 avec les valeurs de [$100 \text{ mgO}_2.\text{L}^{-1}$ - $1300 \text{ mgO}_2.\text{L}^{-1}$] et comme moyenne $541,7 \text{ mgO}_2.\text{L}^{-1}$. Ces deux derniers paramètres s'accompagnent du rapport [DCO]/[DBO5] variant de : [16,8 à 33,2] avec une moyenne de 18,2.

Tableau XVI: La composition physico-chimique des lixiviats pluviaux.

Paramètres	Unité	n	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
MES	mg.L ⁻¹	11	54	1020	503,93	335,46
MVS	mg.L ⁻¹	11	12	667	278,54	240,61
MS	%	11	0,59	1,59	1,02	0,41
MV	% MS	11	40,75	67,58	52,21	7,72
MO	mgO ₂ .L ⁻¹	11	1173,33	8166,67	3645,72	883,93
DCO Brute	mgO ₂ .L ⁻¹	11	3320	21900	9853,8	2482,51
DCO Filtrée	mgO ₂ .L ⁻¹	11	2780	12474	7187,2	619,19
DBO ₅ Brute	mgO ₂ .L ⁻¹	11	100	1300	541,7	84,64
DBO ₅ Filtrée	mgO ₂ .L ⁻¹	11	40	800	360,8	28,78
Rapport [DCO]/[DBO ₅]	*	11	16,8	33,2	18,2	

On constate globalement que la pollution organique (DBO₅, DCO, MO, MS, MVS) indiquerait qu'il s'agit une pollution difficilement biodégradable car le rapport moyen DCO/DBO₅ = 18,2 > 5. Et permet de dire que les lixiviats pluviaux sont stabilisés et d'âge supérieur à 10 ans. En plus la norme de rejet en MES dans le milieu naturelle est de 1000 mg.L⁻¹ alors que les lixiviats ont des valeurs qui respectent la norme sauf la valeur maximale qui dépasse légèrement la norme. Les concentrations moyennes en DBO₅ (542 mg/l) et en DCO (9853 mg/l) dépassent considérablement les normes et conditions de rejet des eaux usées dans les milieux récepteurs, telles qu'établies par les dispositions du Code de l'environnement. Ces normes fixent la DBO₅ à un certain niveau en mg/l et la DCO à 150 mg/l, et les concentrations mesurées excèdent ces limites réglementaires.

Tableau XVII: Les résultats d'analyse des ions des lixiviats pluviaux.

Paramètres	Unité	n	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
NH ₄ ⁺	mg.L ⁻¹	11	120	1900	641,8	842,73
NO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	11	40,65	158,06	90,32	49,09
NO ₂ ⁻	mg.L ⁻¹	11	1,67	1,89	1,8	0,09
NTK	mg.L ⁻¹	11	277,2	1395,8	753,36	515,72
PO ₄ ³⁻	mg.L ⁻¹	11	17	118	39,1	33,63
PT ([PO ₄ ³⁻])	mg.L ⁻¹	11	32	368	165,2	11,78
Cl ⁻	mg.L ⁻¹	11	284	532,5	372,75	110,37399
F ⁻	mg.L ⁻¹	11	34	80	54,6	16,37
SO ₄ ²⁻	mg.L ⁻¹	11	100	2400	1462,5	746,3
Na ⁺	mg.L ⁻¹	11	671	1343	929,7	323,91
K ⁺	mg.L ⁻¹	11	510	1376	840,9	417,15

Ca ²⁺	mg.L ⁻¹	11	960	1200	1050	114,891253
Mg ²⁺	mg.L ⁻¹	11	200	1200	650	443,471157

n= nombre d'échantillon

Des résultats du tableau, il ressort que la pollution azotée est en accord avec les lixiviats des décharges. Il s'agit entre autres de la valeur moyenne NTK =486,3 mg.L⁻¹ et [N-NO₂]=1,8 mg.L⁻¹ avec les lixiviats des stocks des boues et des lixiviats de la décharge de Nador. Cette valeur moyenne ne respecte pas la norme nationale de rejet des eaux usées au BF qui est de 35 mg/l pour le NTK. Cependant les concentrations moyennes en ions [N-NH₄⁺] = 641,8 mg.L⁻¹ , [N-NO₃]=90,32 mg.L⁻¹ sont certes élevées mais les normes de rejet des eaux usées dans les milieux récepteurs en application des dispositions du Code de l'environnement au BF ne précisent pas de valeurs pour ces paramètres de pollution.

La pollution saline (Cl⁻ , , Na⁺ , K⁺ , Ca²⁺ , Mg²⁺) concorde avec la conductivité électrique et les valeurs sont dans le même ordre de grandeur que les lixiviats de boues et la décharge de Nador. La valeur en ion sulfate (SO₄²⁻) est en deçà de la norme de rejet des eaux au BF (SO₄²⁻ = 3 000 mg.L-1). L'ion chlorure (Cl-) présente une valeur élevée, typique des lixiviats de décharges ou de boues. Selon la littérature, l'ion chlorure est considéré comme très mobile, migrer facilement vers les nappes souterraines. Il n'est pas influencé par les phénomènes d'adsorption ou d'échanges d'ions, n'intervient pas dans les équilibres acido-basiques ou d'oxydoréduction, et n'est pas retenu par les complexes argilo-humiques des sols (Chofqi et al., 2004).

En conséquence, l'ion chlorure est couramment employé comme un traceur conservatif efficace pour mettre en évidence l'impact des lixiviats sur la qualité physico-chimique des nappes phréatiques (Abdoul Razak & Adamou, 2020). Les concentrations élevées en conductivité sont corrélées avec les niveaux de chlorure, sulfate, calcium, magnésium, potassium et azote total, une caractéristique fréquemment observée dans les lixiviats. (Makhoukh et al., 2011).

En somme, le ruissèlement du lixiviat dans la nature sans réduction des matières organiques contribue à l'eutrophisation des eaux de surfaces et dans certains cas la contamination des eaux souterraines si la vitesse d'infiltration est importante.

III.2.3. Caractérisations microbiologiques et parasitologiques des lixiviats pluviaux

Le tableau XVII suivant mentionne les résultats d'analyses des paramètres microbiologiques et parasitologiques sur les lixiviats pluviaux.

Tableau XVIII: Les caractéristiques microbiologiques et parasitologiques des lixiviats pluviaux.

Paramètres	Unité	n	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Normes
CF	UFC/100ml	11	4.10^{+3}	$2, .10^{+6}$	1.10^{+6}	1.10^{+6}	2.10^3
SF	UFC/100ml	11	0	$1,25.10^{+4}$	$5,25.10^{+3}$	$5,27.10^{+3}$	1.10^4
Salmonelles	NPP/100 mL	11	$9,2.10^{+2}$	$9,3.10^{+5}$	$3,45.10^{+5}$	$4,37.10^{+5}$	
Coliphages	UFP/100ml	11	$9 .10^{+3}$	$2,49.10^{+4}$	$1,54.10^{+4}$	$7,41.10^{+3}$	
Œufs d'helminthes	Nombre d'œufs/l	11	$2,33.10^{+2}$	$1,6.10^{+3}$	$8,48.10^{+2}$	$5,52.10^{+2}$	<1 œuf/l (OMS, 2006)

n: nombre d'échantillons analysés. Normes : nationales et OMS sur les EU.

Les résultats indiquent que les coliformes fécaux ont une concentration moyenne de 10^6 UFC/100 ml et une concentration moyenne de $5,25.10^3$ pour les streptocoques fécaux. La concentration (CF) ne respecte pas la norme nationale de rejet, tandis que la concentration en (SF) est conforme aux normes réglementaires pour le déversement des eaux usées dans les milieux récepteurs, comme défini par les dispositions du Code de l'environnement. En termes de parasitologie, on remarque la valeur moyenne en œufs d'helminthes est de 848 par litre de lixiviat pluvial. Cependant, cette valeur est largement au-dessus de la norme de rejet selon OMS qui stipule que pour les eaux usées rejetées dans la nature, il faut un œuf/l. Le ruissèlement du lixiviat contenant les germes contribue à la dissémination des germes dans l'environnement ce qui pourraient influent sur la morbidité de la population.

En conclusion, les lixiviats pluviaux issus des stocks de boues déshydratées nécessitent un traitement supplémentaire en assurant un drainage vers la station de traitement du percolât pour l'affinage du traitement et une protection conséquente contre les intempéries. Cela permettra non seulement d'assurer une bonne hygiénisation et en plus, en cas de pluies d'assurer d'une protection suffisante pour éviter la propagation des lixiviats.

III.2.4. Concentration des ETM dans les lixiviats pluviaux

Les teneurs en ETM des lixiviats pluviaux sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau XIX: Concentration des ETM dans les lixiviats pluviaux de Zagtoui.

Paramètres	Unité	n	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type	Norme nationale
Ag	mg.L ⁻¹	11	0	0,0003	0,001	0,0006	
Al	mg.L ⁻¹	11	0,895	3,8293	8,366	3,9849	20
As	mg.L ⁻¹	11	0,007	0,0537	0,081	0,0406	1
Cd	mg.L ⁻¹	11	0	0	0	0	1
Co	mg.L ⁻¹	11	0,037	0,058	0,084	0,024	
Ni	mg.L ⁻¹	11	0,099	0,172	0,224	0,065	4
Fe	mg.L ⁻¹	11	9,077	19,337	27,567	9,411	20
Mn	mg.L ⁻¹	11	0,189	1,321	3,173	1,617	5
Cu	mg.L ⁻¹	11	0,072	0,218	0,459	0,21	2
Zn	mg.L ⁻¹	11	0,946	1,586	2,75	1,01	20
Cr	mg.L ⁻¹	11	0,049	0,097	0,121	0,042	5
Pb	mg.L ⁻¹	11	0,014	0,037	0,081	0,038	2

n= nombre d'échantillon

Les statistiques des teneurs en ETM des lixiviats pluviaux du tableau XIX, nous permet de dire que les concentrations en ETM dans les lixiviats respectent les normes de déversements des eaux usées dans les milieux récepteurs en application des dispositions du Code de l'environnement

III.3. Caractérisation des paramètres des lixiviats expérimentaux

III.3.1. Caractérisations physico-chimiques des lixiviats expérimentaux

Le tableau ci-dessous fait une comparaison des lixiviats expérimentaux obtenus à partir des boues séchées brutes et des boues séchées broyées des tests expérimentaux de lixiviation en colonne.

Tableau XX: Caractéristiques physico-chimiques des lixiviats expérimentaux issus des boues séchées brutes et boues séchées broyées.

Paramètres	Unité	Boues séchées brutes				Boues séchées broyées			
		Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type
Débit	mL/min	50	175	300		50	175	300	
pH	*	6,2	6,4	6,8	0,2	5,8	6,1	6,2	0,2
Eh	mV	-1,1	37,3	71,2	30,9	69,4	75,8	87,7	10,3
CE	mS/cm	4,2	8,1	15	4,5	7,5	10,1	14,2	3,6
Sal	g/L	2,2	4,5	8,6	2,6	2,7	6	9,3	4,7
DCO(Brute)	mgO ₂ .L ⁻¹	478	927,5	1376	387,3	1218	1281,3	1345	63,5
DCO(Filtrée)	mgO ₂ .L ⁻¹	378	791,8	1152	337,7	1112	1148,3	1205	49,7
DBO ₅ (Brute)	mgO ₂ .L ⁻¹	20	60	80	25,3	320	400	560	138,6
DBO ₅ (Filtrée)	mgO ₂ .L ⁻¹	20	40	60	21,9	280	346,7	440	83,3
Rapport DCO/DBO ₅	*	12,9	16,2	23,9	4,1	2,3	3,4	4,2	1
NO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	440	3350	8800	3271,5	0	0	0	0
NO ₂ ⁻	mg.L ⁻¹	4,2	9,4	25,3	8,2	5,3	17,1	28,8	16,6
NH ₄ ⁺	mg.L ⁻¹	19	24,7	33	5,9	33,5	59,2	108	42,3
PO ₄ ³⁻	mg.L ⁻¹	34	40	45	3,8	43	52,7	65	11,2
SO ₄ ²⁻	mg.L ⁻¹	2200	3183,3	4100	872,7	2600	2933,3	3600	577,4
HCO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	488	620,2	793	124,5	549	732	976	219,9
F ⁻	mg.L ⁻¹	0	10,2	32	11,9	7	7	14	4,9
Cl ⁻	mg.L ⁻¹	360,4	1641,8	2823,1	938,9	575,3	2076	3576,7	2122,3
Ca ²⁺	mg.L ⁻¹	528	710,4	1058,4	182,3	732	1080	1368	322,2
Mg ²⁺	mg.L ⁻¹	460	712,7	1140	227	1060	1246,7	1420	180,4

A partir des données du tableau, on remarque lorsque les boues sont broyées les valeurs ont une tendance à augmenter pendant que pour les boues brutes mise en colonne ont des valeurs un peu basses par rapport à celles des boues broyées. Cela pourrait s'expliquer par le fait que si la matière est fine, elle facilite la dissolution et le lessivage des ions. Par contre, lorsque la matière est en tas (des gros gâteaux de boues déshydratées), l'existence des vides donne une facilité de circulation du lixiviant entraînant difficilement les éléments chimiques. Par ailleurs la vitesse de percolation semble avoir un impact sur le transport des polluants : en effet on constate que quand le débit augmente, la concentration en polluant augmente dans le lixiviat expérimental. Cela voudrait dire que la charge polluante des lixiviats est corrélée à l'intensité de pluie. Une forte intensité de pluie entraînerait une forte production de lixiviat et par conséquent une forte charge de pollution résultante. On constate par ailleurs que la valeur moyenne du rapport DCO/DBO5 des boues brutes est de 16,2 ; cette valeur indique les lixiviats sont difficilement biodégradable. Et cela vient confirmer le fait que le lessivage a un très grand impact sur la matière organique créant ainsi une pollution des eaux de surface et souvent des eaux souterraines. Alors que la valeur moyenne du rapport DCO/DBO5 des boues broyées est de 3,4 signifie que les lixiviats sont moyennement biodégradable.

III.3.2. Caractéristiques microbiologiques des lixiviats expérimentaux

Le tableau XIX donne les résultats d'analyses microbiologiques et parasitologiques des lixiviats issus du test de percolation sur colonne. C'est un tableau comparatif des lixiviats issus des brutes et des lixiviats issus des broyées ayant une granulométrie inférieure ou égale à 4 mm.

Tableau XXI: Les paramètres microbiologiques des lixiviats issus des boues séchés brutes et des boues séchées broyées.

Echantillons	Boues brutes				Boues broyées			
Paramètres	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type
CF (UFC/100 mL)	$3,1.10^{+3}$	$7,43.10^{+3}$	$1,04.10^{+4}$	$3,84.10^{+3}$	$1,11.10^{+4}$	$8,01.10^{+6}$	$2,4.10^{+7}$	$1,38.10^{+7}$
SF (UFC/100 mL)	0	0	0	0	0	0	0	0
Salmonelles (NPP/100 mL)	$2,3.10^{+3}$	$4,53.10^{+3}$	9.10^{+3}	$3,87.10^{+3}$	$1,5.10^{+3}$	$9,5.10^{+3}$	$2,3.10^{+4}$	$1,18.10^{+4}$
Œufs d'helminthes (Nombre d'œufs/L)	$2,33.10^{+2}$	$3.10.10^{+2}$	$3,67.10^{+2}$	$6,67.10^{+1}$	$7,33.10^{+2}$	$8,33.10^{+2}$	$9,33.10^{+2}$	1.10^{+2}

Pour ce qui concerne les CF des lixiviats des boues brutes et des boues séchées dont les valeurs moyennes respectives sont de $7,43.10^{-3}$ UFC/100 mL et $8,01.10^{-6}$ UFC/100 mL ne respectent pas les normes de rejet des eaux usées dans nature qui est de 2.10^{-3} UFC/100 mL. En plus, nous constatons que la concentration en CF est plus élevée dans les lixiviats des boues broyées que dans les boues brutes.

Pour la caractérisation en œufs d'helminthes, nous obtenons une valeur moyenne dans les lixiviats des boues brutes 300 œufs/L alors que dans les lixiviats des boues broyées, nous obtenons une valeur moyenne de 833 œufs/L. Ces deux valeurs ne respectent pas la norme OMS qui recommande 1 œuf/L pour une réutilisation des eaux. De même, on constate que la valeur en œufs d'helminthes des lixiviats issus des boues broyées est plus élevée que celle des lixiviats boues brutes.

III.3.3. Concentration des ETM dans les lixiviats expérimentaux

Les statistiques des teneurs en ETM des lixiviats issus du test de percolation sur colonne sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau XXII: Concentrations des ETM des lixiviats expérimentaux.

Echantillon		Lixiviats expérimentaux				Norme nationale
Paramètres	Unité	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type	
Arsenic (As)	mg.L ⁻¹	0,024	0,031	0,037	0,009	1
Nikel (Ni)	mg.L ⁻¹	0,01	0,013	0,015	0,004	4
Manganèse (Mn)	mg.L ⁻¹	0,872	1,226	1,58	0,501	5
Cuivre (Cu)	mg.L ⁻¹	0,089	0,106	0,122	0,023	2
Zinc (Zn)	mg.L ⁻¹	3,267	4,070	4,872	1,135	20
Chrome (Cr)	mg.L ⁻¹	0,001	0,002	0,002	0,001	5
Potassium (K)	mg.L ⁻¹	66,539	75,807	85,075	13,107	
Magnésium (Mg)	mg.L ⁻¹	277,375	334,992	392,609	81,483	
Calcium (Ca)	mg.L ⁻¹	*	*	*	*	
Sodium (Na)	mg.L ⁻¹	18,887	24,884	30,88	8,480	

* : au-dessus de la limite de lecture

Nous remarquons que les teneurs en ETM respectent les normes de rejet. En essayant de faire une petite comparaison avec les ETM des lixiviats pluviaux, on constate que les teneurs en ETM dans les lixiviats pluviaux sont plus élevées que les teneurs en ETM des lixiviats expérimentaux. En plus, ces faibles valeurs des ETM impliquent que les lixiviats sont vieux donc il s'agit des lixiviats stables. Les valeurs élevées en K, Mg, Ca et Na signifient que la minéralisation est très importante ce qui confirme la valeur de la conductivité élevée. Les valeurs élevées de K et Na contribuent à l'imperméabilité des sols d'une importance d'étudier leur impact sur différents sols.

IV. Proposition de solution pour une meilleure gestion des boues séchées

Au vu des insuffisances constatées à la STBV de Zagtouli, nous proposons les solutions suivantes :

– **Sur le plan des infrastructures et équipements :**

Il faut :

- ☐ clôturer la STBV car certains animaux domestiques viennent s'abreuver au niveau des lits séchages;
- ☐ Compléter la construction des lits 48 autres lits de séchages manquant pour se conformer au cahier de charge ;
- ☐ construire la zone de stockage prolonger des boues pour l'hygiénisation complète ou à défaut de les convoier au centre d'enfouissement technique;
- ☐ aménager des collecteurs pour le drainage des lixiviats résiduelles ou des lixiviats pluviaux.

– **Au niveau des ménages**

- ☐ sensibiliser les ménages pour une bonne utilisation des ouvrages d'assainissement (latrines, fosses septiques, Toilettes à chasse manuelle) ;
- ☐ améliorer la gestion des textiles sanitaires dans les ménages en interdisant leurs rejets dans les latrines et encourager textiles réutilisables pour gestion des menstrues;
- ☐ créer un circuit ou des circuits de récupération des déchets spéciaux au niveau des ménages ou par les structures de vente des produits. Par exemple, les médicaments périmés pourraient être récupérer par les officines, les piles usagées par les boutiquiers des quartiers dont les fabricants disposeraient des dispositifs de collectes.

– **Sur le plan de la gestion**

Il faut :

- ☐ rechercher des solutions pour une valorisation des stocks de boues ;
- ☐ améliorer le système de dégrillage des BV brute lors du dépotage ;
- ☐ vidanger régulièrement les refus de dégrillage ;
- ☐ améliorer l'aménagement paysager du site pour une meilleure prise en charge des lixiviats pluviaux
- ☐ installer des piézomètres pour le suivi et contrôle de la pollution des eaux souterraines ;
- ☐ respecter le temps de déshydratation des boues dans les lit de séchage ;
- ☐ améliorer le séchage des boues déshydratées par un étalage d'au moins un mois à une hauteur de 0,5 m avant la mise en tas.

IV. Conclusion

L'importance des STBV dans la filière d'assainissement non collectif n'est plus à démontrer. Des ménages à la STBV, les boues de vidanges provenant des systèmes de prétraitement peuvent être convertis en bio-solides sûrs et en liquide sans pathogènes réutilisable dans l'agriculture ou bien dans la valorisation énergétique. Après le processus de séchage pour la fraction solide et le traitement par lagunage pour la fraction liquide, on devrait obtenir des sous-produits assainis.

Cependant la présente étude qui s'est consacrée à la caractérisation des boues déshydratées pendant les épisodes de pluie révèle que les concentrations en matières organiques respectent les normes de réutilisation et que les concentrations en germes ne respectent pas les normes. Alors que la caractérisation des lixiviats pluviaux et des lixiviats expérimentaux des boues déshydratées brutes indique des lixiviats stables, âgées et difficilement biodégradables avec des teneurs élevées en germes ne répondant pas aux normes de rejet et de réutilisation nationale et internationale. En ce qui concerne les lixiviats expérimentaux des boues déshydratées broyées, la caractérisation montre des lixiviats biodégradables et d'âge intermédiaire avec une concentration importante en germe. Pour toutes les catégories d'échantillons les teneurs en ETM respectent les normes et les recommandations. Par conséquent, au regard des quantités des boues et des résultats de l'études, l'amélioration des conditions de séchage des boues déshydratées, le drainage des lixiviats pluviaux dans le système du traitement du percolât, la vidange régulière des refus de dégrillage et la prospection de meilleure voie de réutilisation des boues traitées sont les solutions de cette étude. En somme, les boues déshydratées sont une richesse mais un désintéressement pourrait être une cause de pollution de l'environnement.

V. Recommandations

Au regard des résultats des analyses et des interprétations, des recommandations et des perspectives ont été formulés ci-dessous afin d'apporter des améliorations pour une meilleure gestion des boues séchées et des lixiviats :

- Aménager la plateforme de stockage et d'hygiénisation des boues séchées ;
 - Récupérer les lixiviats issus des boues en hygiénisation pour les introduire dans le système de traitement du percolât ;
 - Organiser le stockage des boues curées ;
 - Dynamiser le circuit d'envoi des refus de dégrillage au Centre de traitement et de valorisation des déchets ;
 - Faciliter/Favoriser les agricultures qui sont dans les besoins d'avoir accès aux boues hygiénisées après un contrôle de leurs innocuités ;
 - Installer des piézomètres pour assurer la veille sanitaire des eaux souterraines ;
 - Valoriser les boues séchées en réalisant un co-compostage avec les déchets verts de la ville ;
- **Les perspectives**
- ☐ Valoriser les boues séchées en faisant une réutilisation sur des paysages dégradés comme les carrières, les sites de miniers délaissés, ... pour assurer une restauration de ces sites ;
 - ☐ Valoriser les boues séchées en réalisant un co-compostage avec les ordures vertes ou autres déchets ménagers de la ville ;
 - ☐ Mener des études pour une réutilisation des boues déshydratées en cimenterie ou en valorisation énergétique par incinération avec récupération de chaleur.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdoul Razak, M. W., & Adamou, Z. (2020). Caractérisation Physico-Chimique Des Lixiviats Des Décharges : Cas De La Décharge Non Contrôlée De Niamey 2000 (Niamey-Niger). *European Scientific Journal ESJ*, 16(9). <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n9p42>
- Arisily T.A.A., al. (2019). *Technologie de séchage solaire des boues des stations d'épuration des eaux usées et son impact sur la gestion des boues au Maroc*.
- Caballero, J., Conesa, J., Font, R., & Marcilla, A. (1997). Pyrolysis kinetics of almond shells and olive stones considering their organic fractions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 42(2), 159-175.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC,. (2015). *Recherche des coliphages F-spécifiques : Méthode présence/absence* (p. 24 pages).
- Chakraoui, S. (2013). *Déshydratation (phase II) et valorisation des boues issues des eaux usées traitées dans la STEP de Marrakech*.
- Chofqi, A., Younsi, A., Lhadi, E. K., Mania, J., Mudry, J., & Veron, A. (2004). Environmental impact of an urban landfill on a coastal aquifer (El Jadida, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 39(3-5), 509-516. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.07.013>
- Christensen, T. H., Kjeldsen, P., Albrechtsen, H. rgen, Heron, G., Nielsen, P. H., Bjerg, P. L., & Holm, P. E. (1994). Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. *Critical reviews in environmental science and technology*, 24(2), 119-202.
- EDE/EAA. (2014). *Avant projet détaillé de contruction de deux stations de traitement des boues de vidange*.
- Emilie JARDE. (2002). *Composition organique des boues résiduaires de stations d'épuration Lorraines : Caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation*.
- Hartard, C. (2017). *Les bactériophagesARNF-spécifiquescomme indicateurs du danger viral lié à la pollution fécale des matrices hydriques et alimentaires*. Université de Lorraine,.

- Ingallinella, A., Sanguinetti, G., Koottatep, T., Montangero, A., & Strauss, M. (2002). The challenge of faecal sludge management in urban areas-strategies, regulations and treatment options. *Water Science and Technology*, 46(10), 285-294.
- Kengne et al., I. (2009). *Destination finale des produits issus du traitement*.
- Khattabi, H., Aleya, L., & Mania, J. (2002). Changes in the quality of landfill leachates from recent and aged municipal solid waste. *Waste management & research*, 20(4), 357-364.
- Kouawa, T. (2016). *Traitement des boues de vidange par lits de séchage sous climat soudano-sahélien* [Phdthesis, Université de Strasbourg]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01545056>
- M. El-Fadel et al. (2002). *Variation temporelle de la qualité des lixiviats provenant de déchets solides municipaux pré-triés et mis en balles avec une teneur élevée en matières organiques et en humidités*.
- Makhoukh, M., Sbaa, M., & Berrahou, A. (2011). *Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'Oued Moulouya (Maroc oriental)*.
- Maszkowska, J., Kołodziejska, M., Białk-Bielińska, A., Mroziak, W., Kumirska, J., Stepnowski, P., Palavinkas, R., Krüger, O., & Kalbe, U. (2013). Column and batch tests of sulfonamide leaching from different types of soil. *Journal of Hazardous Materials*, 260, 468-474. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.05.053>
- Naidoo, S., & Olaniran, A. O. (2014a). *Treated Wastewater Effluent as a Source of Microbial Pollution of Surface Water Resources*. 22.
- Naidoo, S., & Olaniran, A. O. (2014b). Treated wastewater effluent as a source of microbial pollution of surface water resources. *International journal of environmental research and public health*, 11(1), 249-270.
- Pierre-Henri. al., (2009). *Lit de séchage non planté*.
- Quina, M. J., Bordado, J. C., & Quinta-Ferreira, R. M. (2011). Percolation and batch leaching

- tests to assess release of inorganic pollutants from municipal solid waste incinerator residues. *Waste management*, 31(2), 236-245.
- RODIER J. al. (2009). *L'analyse de l'eau. 9 ème édition*.
- Rumphorst, M., & Ringel, H. (1994). Pyrolysis of sewage sludge and use of pyrolysis coke. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 28(1), 137-155.
- Strauss, M., & Montangero, A. (2002). Faecal sludge management—review of practices, problems and initiatives. *Duebendorf, Water and Sanitation in Developing Countries EAWAG/SANDEC*.
- Tayler, K. (2018). *Faecal Sludge and Septage Treatment : A guide for low and middle income countries* (Practical Action Publishing Ltd). <http://dx.doi.org/10.3362/9781780449869>
- Tayler, K. (2020). *Le traitement des boues de vidange : Un guide pour les pays à revenus faibles et intermediaires*.
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium des systèmes et technologies d'assainissement*.
- Trabelsi, S. (2011). *Etudes de traitement des lixiviats des déchets urbains par les procédés d'oxydation avancée photochimiques et électrochimiques : Application aux lixiviats de la décharge tunisienne" Jebel Chakir"* [PhD Thesis, Université Paris-Est]. <https://theses.hal.science/tel-00674731/>
- Trebouet, D., Schlumpf, J., Jaouen, P., & Quemeneur, F. (2001). Stabilized landfill leachate treatment by combined physicochemical–nanofiltration processes. *Water Research*, 35(12), 2935-2942.
- U.S. EPA. (2015). *REVIEW OF COLIPHAGES AS POSSIBLE INDICATORS OF FECAL CONTAMINATION FOR AMBIENT WATER QUALITY*. Health and Ecological Criteria Division,.
- WHO. (1996). *Analysis of Wastewater for Use in Agriculture : A Laboratory Manual of*

Parasitological and Bacteriological Techniques. WHO.

Yixuan, H. (2011). *Mise au point d'un essai de caractérisation environnementale sur matériau monolithique par percolation ascendante*.

Zerrouqi, Z., Sbaa, M., Chafi, A., & Elhafid, D. (2011). Investigation du lessivage des stocks de boues d'épuration de Nador : Étude sur terrain et apport de l'expérimentation. *Revue des sciences de l'eau*, 24(4), 371-381.

ANNEXES

Annexe I : Méthodes d'analyses des boues séchées

■ Préparation de la poudre de boue séchée pour les analyses physico-chimiques

Pour réaliser la préparation, il faut :

- faire le séchage dans une étuve à 105°C afin d'éliminer totalement de l'humidité contenue dans l'échantillon pendant 24 heures;
- réaliser le broyage de la boue séchée dans un mortier en triturant ;
- et tamiser pour obtenir de la poudre et retenir les grosses particules.

La poudre obtenue des différents points de prélèvement seront utilisés pour les analyses physico-chimiques. Les paramètres concernés comme le pH, la conductivité, la microbiologie ; les boues ne seront pas passé à l'étuve.

■ Procédure pour la détermination de la Matière Sèche (MS) et du taux d'humidité (H)

A l'aide d'un creuset en platine et d'une balance de précision, l'on détermine d'abord la masse à vide est du creuset (masse M_0). On introduit ensuite une quantité de boues puis on mesure la masse de l'ensemble creuset + boues et noté M_1 . Le creuset contenant la boue est séché dans une étuve réglée à 105°C. pendant 24 h. L'ensemble (creuset+ boue sèche) est laissé en refroidissement dans un dessiccateur pendant une demie heure puis à nouveau pesé. On obtient une masse M_2 .

Les formules ci-dessous permettent de déterminer la matière sèche et le taux d'humidité :

$$MS(\%) = \left(\frac{M_2 - M_0}{M_1 - M_0} \right) * 100$$

$$H(\%) = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} \right) * 100$$

Où :

MS représente la teneur en matière sèche de l'échantillon de boue en pourcentage ;

H correspond au taux d'humidité des boues en pourcentage ;

M_0 est la masse initiale du creuset (vide) en grammes ;

M_1 est la masse du creuset contenant l'échantillon de boues en grammes ;

M_2 est la masse du creuset avec la matière sèche de l'échantillon après séchage à 105°C en grammes.

Annexe II : Détermination de la perte au feu (MO) et de la matière minérale (MM)

Le protocole utilisé pour déterminer la matière organique (MO) et la matière minérale (MM) est appelé la méthode de perte au feu. Cette méthode permet de mesurer directement la quantité de matière organique et minérale présente dans l'échantillon de boue. L'ensemble creuset + boues sèches obtenu précédemment est placé dans un four réglé à 550 °C. Après 1 heure 30 minutes de calcination, l'ensemble est retiré du four et placé dans un dessiccateur pour refroidir pendant 30 minutes. Une nouvelle pesée est effectuée, donnant une masse M_3 . La matière organique et la matière minérale de l'échantillon de boue sont obtenues en appliquant les relations 3 et 4 suivantes :

$$MO = \left(\frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_0} \right) * 100$$

$$MM = \left(\frac{M_3 - M_0}{M_2 - M_0} \right) * 100$$

où :

MO représente la teneur en matières sèches volatiles de l'échantillon de boues, en pourcentage ;

MM représente la teneur en matière minérale de l'échantillon de boues, en pourcentage ;

M_0 est la masse du creuset vide, en grammes ;

M_2 est la masse du creuset contenant la matière sèche de l'échantillon de boues après séchage à 105°C, en grammes ;

M_3 est la masse du creuset contenant la matière calcinée de l'échantillon de boues après calcination à 550°C, en grammes.

Annexe III : Protocole d'analyse du NTK

L'azote total Kjeldahl (TKN) est la somme de l'azote organique, de l'ammoniac (NH_3) et de l'ammonium (NH_4^+) dans l'analyse chimique du sol, de l'eau et des eaux usées. Pour calculer l'azote total (TN), les concentrations de nitrate-N et de nitrite-N sont déterminées et ajoutées à l'azote total Kjeldahl.

Aujourd'hui, l'azote total Kjeldahl est un paramètre requis pour la détection réglementaire dans de nombreuses installations de traitement des eaux.

Minéralisation

Dans les tubes de NTK préalablement lavés et rincés avec l'eau distillée. Un mélange de :100 mL de chaque échantillon +10 mL d'acide sulfurique concentrée (H_2SO_4 ; « 6N) à 95 à 97% pur +une pincée de sélénium noire (Se) + 0,7 g d'acide salicylique (en raison 35 g pour 500 mL d'acide sulfurique) et 5 billes par tube. Puis les tubes sont placés dans le minéralisateur et chauffés en plusieurs étapes en réglant les différentes températures suivantes :

- ◆ 180°C pendant 2 heures ;
- ◆ 250 °C pendant 2 heures ;
- ◆ 340°C pendant 2 heures ;

Après les chauffages en cascade, les tubes sont laissés en refroidissement pendant 24 heures.

Distillation et dosage

Le minéralisât est distillé en milieu alcalin (excès de soude ; 10 N) Réaliser la distillation avec 20 mL d'acide borique (H_3BO_3) dans un erlenmeyer puis 2 gouttes de rouge de méthyle ;

Placer l'erlenmeyer dans le distillateur et le tube ;

Ajouter 50 mL de soude à ;

Arrêter le distillateur lorsqu'on atteint 200 mL du distillat dans l'erlenmeyer ;



Distillation après
minéralisation de
l'échantillon.

- Mettre en marche et recueillir le produit condensé lorsqu'il atteint 200 mL ;
- Doser le produit condensé avec de l'acide sulfurique à 0,1 N

Formule de calcul de NTK

$$\text{NTK} = \frac{V_1}{V_0} \times [C] \times 14 \times 1000$$

V₀ : Volume prise d'essai (mL)

V₁ : Volume solution titré ;

[C] : Concentration de l'acide de titrage ;

14 : Masse atomique de l'azote

Matière Organique Total

Le pourcentage en matière organique totale (% MOT) ou en solides volatils est calculé en soustrayant la masse de l'échantillon séché à 105 °C de la masse de l'échantillon après calcination, puis en divisant le résultat par la masse initiale de l'échantillon, le tout multiplié par 100. La formule est la suivante (Charnay, 2005) :

Annexe IV : Protocole d'analyse microbiologique

◆ Indicateur de contamination fécale

La technique d'ensemencement utilisée est celle en profondeur sur milieu solide. Le principe de la méthode consiste à prendre un volume de 1 ml de l'échantillon et/ou de ses dilutions dans une boîte de Pétri, puis à couler le milieu spécifique et laisser se solidifier. Les coliformes fécaux sont ensemencés avec le milieu Chromocult Coliforms Agar, et les streptocoques fécaux avec Chromocult Enterococci Agar. Les températures d'incubation sont de 37 °C pour les streptocoques fécaux, tandis que les coliformes fécaux sont incubés à 44,5 °C.

Pour le dénombrement des colonies, il faut considérer les colonies bleues et violettes qui représentent *E. coli*. Les colonies de *E. coli* et les colonies roses donnent la valeur des colonies des coliformes fécaux. Les streptocoques présentent également une coloration rose.

La concentration des différents germes est donnée par la formule ci-dessous :

$$[\text{CF/SF}] = \frac{n}{V \text{ inoculée}} * \text{Fd} * 100$$

$n \in [30 ; 300]$; $V \text{ inoculé} = 1 \text{ ml}$

➤ Les Salmonelles

La détection des salmonelles se fait en deux étapes : la première consiste à l'enrichissement de l'échantillon et la seconde est l'isolement sur un milieu gélosé spécifique. La méthode employée ici est celle du nombre le plus probable (NPP) avec l'aide du tableau de Mac Gray.

Pour l'expression des résultats, l'usage de la table de MacGrady pour les dilutions à trois successives permet de trouver la valeur du npp. Cela permet d'avoir la concentration salmonelle par la formule ci-dessous :

$$[\text{S}] = \frac{npp}{V \text{ inoculée}} * \text{Fd} * 100 ; V \text{ inoculé} = 1 \text{ ml}$$

➤ Coliphages

Pour la détermination des coliphages, l'utilisation d'une souche hôte de *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028) est nécessaire. Il faut au préalable la souche de *Salmonella typhimurium* de sur le milieu **Tryptic Soy Agar (TSA)** préparé selon les indications consignées sur la boîte, refroidi et coulé dans les boîtes de pétri. Pour l'ensemencement, elle se fait en milieu stérile en réalisant des stries serrées et larges à la surface du milieu de culture solidifié. Après ensemencement, les boîtes sont incubées à 37°C durant 24h. L'objectif est d'assurer un développement des souches de *Salmonella typhimurium* afin de les mettre en contact avec les

échantillons et observer une réaction des virus s'ils existent.

Après incubation, les colonies ayant poussées ont été introduites dans des tubes contenant du bouillon nutritif qu'on a incubé à 37°C de sorte à avoir une croissance logarithmique nécessaire à l'identification des coliphages.

L'étape suivante consiste à préparer une solution double concentration de TSA. Après le refroidissement du milieu double TSA, on prélève successivement 1ml de bouillon, 100ml de l'échantillon et/ou des dilutions et 100ml du milieu TSA **double** dans des bouteilles stériles. Ensuite, il faut procéder par une homogénéisation mélange et couler dans des boites de pétri en les remplissant presque. Enfin, les boites sont incubées à 37°C pendant 24h.

La lecture consiste à observer et dénombrer les lyses de bactéries témoignant la présence de virus. Les lyses ont un aspect ressemblant aux grains de riz.

A l'aide de la formule ci-dessous, on obtient les résultats en concentration de coliphages : sont exprimés en UFP/100ml

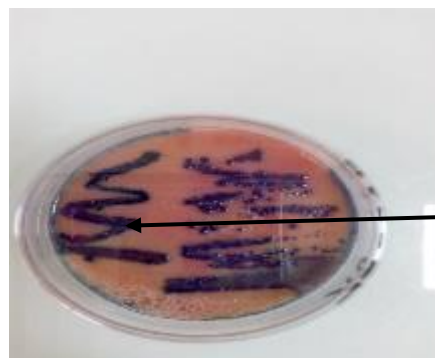
$$[\text{Coliphages}] = \frac{n}{V_{\text{inoculé}}} * Fd ; n \in [30 ; 300] ; V_{\text{inoculé}} = 1 \text{ ml}$$

Avec :

[Coliphages] : UFP/100 mL (UFP : Unité Format Particules)

n : le nombre de lyse

Fd : le facteur de dilution



Colonies noires et
rouges violacées
(présence présumptive
de salmonelles)

➤ Parasites

La méthode de Baillenger modifiée est une technique parasitologique couramment utilisée pour la recherche des œufs d'helminthes et des kystes de protozoaires dans les échantillons. Cette méthode implique généralement plusieurs étapes, dont la concentration des parasites présents dans l'échantillon, la préparation d'une lame pour observation microscopique, et l'utilisation de colorants spécifiques pour faciliter la visualisation. (WHO, 1996).

Protocole de recherche des œufs d'helminthes

- Prélever 1000 mL de l'échantillon dans un cône ;
- Décanter (Laisser au repos) pendant de 48 heures ;
- Après les 48 heures, aspirer le surnageant et retenir le culot ;
- Verser les culots dans des tubes à centrifuger ;
- Centrifuger à 10x100 rpm pendant 15 minutes ;
- Retenir à nouveau le culot et réduire le nombre de tubes en deux ou un tube ;
- Centrifuger à nouveau ;
- Ajouter le même volume que le culot de tampon d'acéto-acétique ;
- Ajouter 2 fois le volume du culot par l'éther diéthylique ;
- Centrifuger et observer la formation des 3 phases puis retenir la 3^{ème} phase ;
- Ajouter 5 fois le volume de sulfate de zinc ;
- Vortexer et laisser au repos ;
- Réaliser la lecture au microscope sur plusieurs lames au moins deux ou trois,...

A l'aide de la formule ci-dessous, on détermine le nombre d'œuf par litre d'échantillon (N) :

$$N = \frac{A * X}{P * V}$$

N = nombre d'œufs par litre d'échantillons ;

A = nombre moyen d'œufs comptés sur la lame à partir des trois essais ;

X = volume du produit final (ml)

P = volume de la lame (ml)

V = volume d'échantillon brute (litres)

Analyse du Phosphate Total

- Prélever 25 mL de l'échantillon brute dans un erlenmeyer ;
- Ajouter 2 mL d'acide sulfurique concentré 25,5 N ;
- Ajouter 5 billes ;
- Ajouter une pincée de persulfate de potassium ;

- Minéraliser sous la hôte pendant 30 minutes en ajoutant au fur et à mesure de l'eau distillée pour maintenir le niveau du volume ;
- Laisser refroidir et ajouter 2 mL de la 5 N ;

Préparation du blanc

- Il se prépare de la même manière que l'échantillon avec de l'eau distillée de 25 mL

Pour la lecture des valeurs :

- Verser dans une cuve de 25 mL et ajouter 1 mL de molybdovanadate ;
-
- Presser le code 480 avec la longueur d'onde de ;

Analyse de la DCO brute

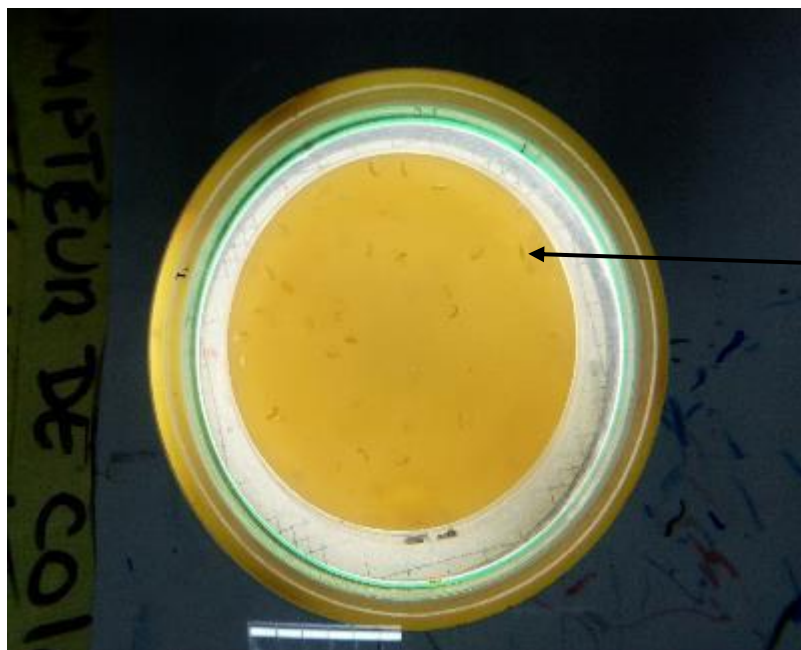
- Prélever 2,5 mL de l'échantillon brute dans un tube ;
- Ajouter 3,5 mL d'acide DCO et 1,5 mL de dichromate de potassium (**K₂Cr₂O₇**) ;
- Homogénéiser légèrement ;
- Préparer le blanc avec de l'eau distillée (2,5 mL d'eau distillée + 3,5 mL d'acide DCO + 1,5 de **K₂Cr₂O₇**) ;
- Porter l'échantillon et le blanc dans le minéralisateur DCO à 150°C pendant 2 heures ;
- Après les 2 heures, laisser refroidir ;
- Faire la lecture avec le spectrophotomètre DCO.

Analyse de la DCO filtrée

- Elle se réalise de la même manière que la DCO brute seulement il faut au préalable filtré l'échantillon ;

Analyse de la DBO₅ brute

- Prélever 22,7 mL de l'échantillon brute (non filtré) dans une bouteille ombrée ;
- Mettre un barreau aimanté ;
- Boucher avec un godet puis mettre 3 ou 4 pastilles d'hydroxyde de potassium dans le godet ;
- Fermer la bouteille avec un oxytop ;
- Mettre à zéro dans le compteur oxytop ;
- Mettre la bouteille dans l'armoire thermostaté et attendre 5 jours ;
- Après les 5 jours procéder à la lecture.



Zone de lyse

Annexe V : Norme de rejet et de réutilisation des eaux usées au Burkina Faso

N°	Paramètres	Valeurs limites
1.	Aluminium total	20 mg/l
2.	Arsenic total	1 mg/l
3.	Bioxyde de chlore	0,5 mg/l
4.	Brome actif	1 mg/l
5.	Cadmium total	1 mg/l
6.	Chlore actif	3 mg/l
7.	Chrome VI	0,5 mg/l
8.	Chrome total	5 mg/l
9.	Cuivre total	2 mg/l
10.	Cyanure facilement décomposable	1 mg/l
11.	Détergents totaux	20 mg/l
12.	Fer total	20 mg/l
13.	Fluorures	15 mg/l
14.	Manganèse total	5 mg/l
15.	Matières en suspension (MES)	1 000 mg/l NB : la dimension de cette matière ne peut dépasser 10 mm
16.	Matières extractibles à l'éther pétrole	500 mg/l
17.	Mercure total	0,05 mg/l
18.	Nikel total	4 mg/l
19.	Pesticides et produits similaires	0,01 mg/l
20.	pH	6,5 - 10,5 N.B : Si les eaux déversées proviennent de l'utilisation d'une eau de surface ou souterraine, le pH naturel de ladite eau, s'il est

		inférieur à 6,5 peut être admis comme valeur limite des eaux déversées.
21.	Plomb total	2 mg/l
22.	Solvants chlorés	0,1 mg/l
23.	Sulfates	3000 mg/l
24.	Sulfures	10 mg/l
25.	Température	45 °C
26.	Zinc total	20 mg/l

Annexe VI : Norme de rejet des eaux usées dans le milieu naturel au Burkina Faso

N°	Paramètres	Valeurs limites
1.	Aluminium total	5 mg/l
2.	Azote Kjeldahl	35 mg/l;
3.	Arsenic total	0,2 mg/l
4.	Cadmium total	1 mg/l;
5.	Chlore actif	0,05 mg/l
6.	Chrome III dissous	2 mg/l
7.	Chrome VI	0,5 mg/l;
8.	Chrome total	5 mg/l
9.	Coliformes fécaux	2000 UFC/100ml
10.	Cuivre total	2 mg/l
11.	Cyanure facilement décomposable	1 mg/l

12.	Demande biologique en oxygène des eaux déversées, mesurée sur eau filtrée pour les déversements provenant des procédés d'épuration par lagunage	40 mg/l
13.	Demande chimique en oxygène des eaux déversées, mesurée sur eau filtrée pour les déversements provenant des procédés d'épuration par lagunage. Le recours au filtrage n'est pas d'application pour les eaux usées industrielles et les eaux usées domestiques contenant plus de 25% d'eaux usées industrielles	150 mg/l
14.	Fer total	10 mg/l
15.	Fluorures	10 mg/l
16.	Teneur en hydrocarbures non polaires	10 mg/l
17.	Manganèse total	5 mg/l
18.	Mercure total	0,05 mg/l
19.	Nickel total	4 mg/l;
20.	Pesticides organiques chlorés	0,003 mg/l
21.	pH	6,5 et 9,0
22.	Température	40°C
23.	Zinc total	5 mg/l

Annexe VI : Critère d'appréciation de la minéralisation et du potentiel redox

N°	Intervalle d'appréciation	Appréciation
1.	Conductivité < 100 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation très faible
2.	100 $\mu\text{S/cm}$ < Conductivité < 200 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation faible
3.	200 $\mu\text{S/cm}$ < Conductivité < 333 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation moyenne
4.	333 $\mu\text{S/cm}$ < Conductivité < 666 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation moyenne accentuée
5.	666 $\mu\text{S/cm}$ < Conductivité < 1000 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation importante
6.	Conductivité > 1000 $\mu\text{S/cm}$	Minéralisation élevée

N°	Intervalle d'appréciation	Appréciation
1.	Les couples ayant des E° élevés (positifs)	Oxydants forts.
2.	Les couples ayant des E° très bas (négatifs)	Réducteurs forts

Annexe VII : Les objectifs de traitement de la phase liquide et la phase solide

Objectifs du traitement de la phase liquide

Technique de réutilisation		Œufs d'helminthes	Coliformes fécaux Unité/100 ml
A	Irrigation restrictive (arbres, plantes industrielles, cultures fourragères, pâturages)	≤ 1	Sans objet
	L'irrigation des arbres fruitiers avec les eaux traitées doit cesser deux semaines avant la cueillette, et les fruits tombés ne doivent pas être récoltés.		
B	Irrigation non-restrictive (plantes comestibles, terrains de sport, parcs publics)	≤ 1	≤ 1000

Objectif de qualité pour le produit solide dans le traitement

L'objectif de traitement de la fraction solide des boues dépend de la réutilisation ou pas des boues séchées. Dans le cas d'une réutilisation en agriculture des boues séchées, les limites acceptables de qualité sont particulièrement importantes. Même si cela nécessite des précautions importantes, la réutilisation des boues issues du traitement des boues de vidange est une solution à favoriser car elle constitue une solution adaptée à l'évacuation des quantités importantes de boues produites. D'ailleurs, la pratique est bien connue in situ puisque des boues brutes sont actuellement déversées dans les champs et directement utilisées. La boue sèche constitue un excellent fertilisant et présente généralement les caractéristiques suivantes (sans chaulage) :

- matière sèche = 90 à 95% ;
- matières minérales = 50 à 55% ;
- matières organiques = 45 à 70% ;
- azote total = 2 à 6% ;
- phosphore (phosphore P_2O_5) et potassium (potasse K_2O) = 4 à 7%.

Afin de ne pas contribuer à la diffusion de risques sanitaires par la valorisation des boues dans l'agriculture, les exigences pour les boues séchées devront respecter la valeur critique de 3-8 œufs d'helminthes/g MS. Le respect de cette valeur garantit également un niveau sûr pour les coliformes fécaux. Les autres paramètres ne sont pas critiques.

Annexe VIII : Protocole d'analyse des Eléments Traces Métalliques (ETM) avec l'ICP-EOP

❖ Le lavage du matériel

Le matériel est lavé d'abord et mise en contact avec une solution d'EDTA pendant 24heures. Ensuite, on immerge le matériel dans une solution d'acide nitrique à 1% pendant 24heures également. Les réactifs utilisés (HNO_3 95% ; HCl 37%) étaient de qualité supra pure.

❖ Préparation des Echantillons

Pour les échantillons liquide :

La méthode d'extraction consiste à ajouter délicatement 5 mL l'acide nitrique dans 250 mL de l'échantillon.

Pour les échantillons solides :

L'extraction des ETM s'opère par la méthode de l'eau régale. Elle consiste à peser dans un erlenmeyer rodé de 250ml, 1 g de l'échantillon préalablement séché à l'étuve (105°C pendant 24heures) et broyé. On y ajouter 1 ml de HNO_3 95% et 3 ml d' HCl 37%, concentrés. Le tout est porté en ébullition durant 15 mn. Après refroidissement et rinçage du réfrigérant par quelques ml d'eau déminéralisée. Les échantillons sont filtrés avec une membrane GFC. On rincer plusieurs fois le résidu insoluble retenu sur le filtre par de l'eau déminéralisée afin d'amener le volume à 100 mL.

❖ Préparation des solutions étalons

Elles se font à base des solutions étalons standards. Ces solutions étalons serviront au calibrage de l'appareil avant l'analyse de chaque échantillon.

❖ Mesure des concentrations des échantillons

Après le calibrage, l'appareil analyse automatiquement les échantillons. Et les résultats sont stockés sur une machine que l'on récupère pour les affiner.

Annexe VII : Matériels utilisés



Spectrophotomètre DR 3900



Mixer



Distillateur NTK
(BÜCHI Unit K-355)



Plaque chauffante DCO



Spectrophotomètre à
flamme de type JENWAY