



**TRAITEMENT DES BOUES DE VIDANGE PAR LITS DE SECHAGE
PLANTES EN UTILISANT LE CHARBON DE BAMBOU COMME
CONDITIONNEUR PHYSIQUE SOUS CLIMAT SOUDANO-SAHELIEEN.**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER EN INGÉNIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
SPECIALITE EAU ET ASSAINISSEMENT

Présenté et soutenu publiquement le [20 janvier 2020] par

Sati BAKAYOKO 20160134

Encadrant 2iE : Prof Yacouba KONATE, Enseignant-Chercheur

Responsable du Laboratoire Eaux-Hydro Systèmes et Agriculture (LEHSA)

Jury d'évaluation du mémoire :

Présidente : Dr Héra KAROUI

Membres et correcteurs : Prof Yacouba KONATE
Dr TADJOUA KOUAWA

Promotion [2018/2019]

DEDICACE

*A **Dieu** tout puissant de m'avoir prêté vie jusqu'à ce jour.*

*A mon père **Youssouf BAKAYOKO** et ma mère **Alimata TIMITE**, pour avoir toujours cru en moi.*

*A mon oncle **Namory TIMITE** et mes tantes **Nodjiadé TIMITE**, **Fatou TIMITE** pour leur soutien morale et matériel.*

*A mes **Frères** et **Sœurs** pour leur encouragement et leur prière.*

*A mes **Camarades** de la promotion, ainsi qu'à tous mes **amis** qui m'ont soutenu de près ou de loin.*

CITATION

« Là où il y'a un problème, il existe un potentiel d'amélioration »

Masaaki IMAI

« L'eau c'est la vie, l'assainissement c'est l'assurance vie »

Yacouba KONATE

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

REMERCIEMENTS

Ce mémoire n'aurait pas pu être réalisé sans la contribution de près ou de loin de plusieurs personnes et de l'institut 2iE. C'est le lieu d'exprimer notre gratitude à tous ceux qui ont, d'une manière ou d'une autre, permis sa réalisation. Il s'agit de :

- La direction générale de l'institut 2iE pour la qualité des enseignants et des cours dispensés pendant les trois années d'étude.
- **Prof. Yacouba KONATE**, Responsable du LEHSA (Laboratoire Eaux-Hydro Systèmes et Agriculture) qui a accepté de diriger mon travail malgré ses multiples préoccupations et sa rigueur scientifique.
- **Prof. Mariam DAKOURE / SOU**, Responsable de la gestion et la valorisation des connaissances scientifiques pour ses nombreux conseils.
- **M. Agyemang Richard OSEI**, Ingénieur de recherche-doctorant.
- **Dr. Seyram SOSSOU**, Enseignant-Chercheur, **Dr. Boukary SAWADOGO**, Enseignant-Chercheur, **M. Moustapha OUEDRAOGO**, Technicien supérieur de laboratoire, **M. TINDOURE Raogo Guy Noel**, Technicien supérieur de laboratoire pour l'accueil, l'accompagnement, les conseils tout le long du travail.
- Mon père **Youssouf BAKAYOKO**, pour son soutien indescriptible et ses prières, mon oncle **Namory TIMITE**, mes frères et sœurs pour leurs soutiens et prières.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

RESUME

De nombreux pays en développement d'Afrique subsaharienne s'appuient principalement sur des systèmes d'assainissement (OSS). C'est le cas du Burkina Faso où la forte dépendance à l'égard de ces systèmes (environ 80%) a conduit à une production importante de boues d'épuration (BV), qui présentent divers risques environnementaux et sanitaires. Le traitement des boues de vidange est le maillon faible de la gestion des boues de vidange en Afrique de l'Ouest. Les lits de séchage plantés et non plantés sont des techniques d'ingénierie prometteuses pour le traitement efficace des boues de vidange (BV). Cette étude portait sur le traitement des boues fécales en utilisant les lits de séchage plantés avec du charbon de bambou comme conditionneur physique dans le contexte sahélien. Le dispositif expérimental est composé de 12 lits de séchage expérimentaux avec 6 lits plantés et 6 lits non plantés. La moitié des lits plantés (T3, T6 et T9) a été chargée avec du BV mélangé à du charbon de bambou broyé, tandis que l'autre moitié (T1, T4 et T8) a été chargée avec du BV uniquement. Le même traitement a été appliqué aux lits non plantés avec du charbon de bambou (T7, T11 et T14) et sans charbon de bambou (T5, T10 et T13) respectivement. Un taux de chargement annuel de 233,3 kg MS/m².an a été appliqué pour les lits alimentés avec un mélange BV/charbon et 155,6 kg MS/m².an pour les lits alimentés avec BV uniquement. La qualité des boues de vidange, des biosolides accumulés sur les lits et du percolât a été contrôlée pendant 3 mois avec l'analyse des paramètres de pollution physico-chimique (MS, MES, MVS, DCO, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻, PT, P-PO₄³⁻) et des indicateurs de contamination (coliformes fécaux, Streptocoques fécaux et œufs d'helminthes). Les résultats ont montré des taux d'humidité moyens de 8,36 %, 6,21 %, 19,07 % et 18,33 % et une teneur moyenne en matière sèche de 91,64 %, 93,79 %, 80,39 % et 81,67 % respectivement pour (T3, T6 et T9), (T1, T4 et T8), (T7, T11 et T14) et (T5, T10 et T13) avec un rapport C/N global de 11,06. La qualité des biosolides semble avoir une valeur fertilisante élevée (Norg : 2,15%, PO₄³⁻ : 2,83%, COT : 23,8%, PT : 23,5% et TKN : 8,58%). La concentration d'œufs d'helminthe a été réduite de 50979 œufs/g de MS à 1597 œufs/g de MS après 3 mois de surveillance, soit une réduction de 96,87 %. L'élimination globale des coliformes fécaux a cependant été supérieure à 3Ulog. L'étude a généralement démontré une adaptabilité satisfaisante du *Bambusa Vulgaris* aux conditions dynamiques du lit de séchage de l'expérience et peut être adoptée comme macrophyte pour le traitement de la BV dans la ville de Ouagadougou.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Mots Clés :

1. Boues de vidange,
2. Traitement,
3. Bambusa Vulgaris,
4. Charbon de bambou,
5. Lit planté

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

ABSTRACT

Many developing countries in sub-Saharan Africa rely mainly on-sanitation systems (OSS). This is the case of Burkina Faso where the heavy dependence on these systems (about 80%) has led to a significant production of sewage sludge, which presents various environmental and health risks. The treatment of faecal sludge is the weak link in the management of faecal sludge in West Africa. Both planted and unplanted drying beds are promising engineering techniques for the effective treatment of faecal sludge (FS). This study was for the treatment of faecal sludge using the planted drying beds with bamboo charcoal as a physical conditioner in the Sahelian context. The experimental set-up is composed of 12 experimental drying beds with 6 planted beds and 6 non- planted beds. Half of the planted beds (T3, T6 and T9) were loaded with BV mixed with crushed bamboo charcoal while the other half (T1, T4 and T8) were loaded with FS only. The same treatment was applied to the non-planted beds with charcoal (T7, T11 and T14) and without charcoal (T5, T10 and T13) respectively. An annual loading rate of 233.3 KgM S/m².year was applied for beds fed with FS /charcoal mixture and 155.6 KgMS/m².year for beds fed with FS only. The quality of the faecal sludge, the biosolids accumulated on the beds and the percolate were monitored for 3 months with the analysis of physico-chemical pollution parameters (DM, TSS, TVS, COD, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N, TP, PO₄³⁻-P) and contamination indicators (faecal coliforms, faecal Streptococci and helminth eggs). The results showed e average humidity levels of 8.36%, 6.21%, 19.07% and 18.33% and the average dry matter content of 91,64%, 93.79%, 80.39% and 81.67% respectively for (T3, T6 and T9), (T1, T4 and T8), (T7, T11 and T14) and (T5, T10 and T13) with overall C/N ratio of 11.06. Biosolids quality seems to have a high fertilizer value (Norg: 2.15%, PO₄³⁻ : 2.83%, CT: 23.8%, TP: 23.5% and TKN: 8.58%). Helminth egg concentration was reduced from 50979 eggs/g DM to 1597 eggs/g DM after 3 months of monitoring, i.e. a 96.87% reduction. The overall elimination of faecal coliforms, was however higher than 3Ulog. The study generally demonstrated a satisfactory adaptability of the Bambusa Vulgaris to the dynamic drying bed conditions of the experiment and can be adopted as a macrophyte for the treatment of FS in the city of Ouagadougou.

Key words:

Bamboo Biochar, Treatment, Bambusa Vulgaris, Faecal Sludge, Planted bed

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE	:	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AIC	:	Association International de la Cartographie
BV	:	Boues de Vidange
CF	:	Coliformes Fécaux
CH	:	charbon
COT	:	Carbone Organique Total
DBO₅	:	Demande Biologique en Oxygène en 5 jours
DCO	:	Demande Chimique en Oxygène
E-Coli	:	Escherichia Coli
LSnP	:	Lit de Séchage non planté
LSnP+BV	:	Lits de séchage non-Plantés avec boues de vidange
LSnP+BV+CH	:	Lits de séchage non-Plantés avec boues de vidange plus charbon
LSP	:	Lit de Séchage planté
LSP +BV	:	Lits de séchage Plantés avec boues de vidange
LSP+BV+CH	:	Lits de séchage Plantés avec boues de vidange plus charbon
MES	:	Matière en Suspension
MO	:	Matière Organique
MS	:	Matière Sèche
MVS	:	Matière Volatile en Suspension
NH₃⁺	:	Ions Ammoniac
NH₄⁺	:	Ions Ammonium
NO₂⁻	:	Nitrite
NO₃⁻	:	Nitrate
Norg	:	Azote Organique
NT	:	Azote Total
NTK	:	Azote total kjeldahl
pH	:	Potentiel Hydrogène
PT	:	Phosphore Total
SF	:	Strestocopes Fécaux
SIBEAU	:	Société Industrielle d'Equipement et Assainissement
UFC	:	Unité Formant Colonie

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

VIP	:	Ventilated Improved Pit (fosse améliorée ventilée)
H	:	Humidité
δ	:	Ecart-Type

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

SOMMAIRE

<i>Dédicace</i>	<i>ii</i>
<i>CITATION</i>	<i>iii</i>
<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>iv</i>
<i>RESUME</i>	<i>v</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>vii</i>
LISTE DES ABREVIATIONS	viii
LISTE DES TABLEAUX	3
LISTE DES FIGURES.....	4
<i>I. Introduction</i>	5
<i>II. synthèse bibliographique</i>	7
II.1 Problématique des boues de vidange en Afrique Subsaharienne	7
II.2 Typologie des boues de vidange.....	8
II.3 Traitement des Boues de vidange	11
II.4 Critères de choix d’une option de traitement.....	12
II.5 Les traitements des boues de vidange existants.....	12
II.6 Réutilisation des BV déshydratées dans l’agriculture	15
II.7 Les lits de séchage (LS).....	15
II.7.1 Les lits de séchage non plantés (LSnP)	15
II.7.2 Lits de Séchage Plantés (LSP).....	16
<i>III. Matériels et Méthodes</i>	19
III.1 Dispositif expérimental	19
III.2 Zone d’étude.....	19
III.3 Description du dispositif expérimental	20
III.3.1 Les supports.....	20
III.3.2 Installation du pilote	21
III.3.3 Matériaux de garnissage des lits de séchage	21
III.3.4 Dispositif d’aération et de drainage	23
III.3.5 Sélection et mise en place des plantes.....	23

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

III.4	Alimentation des lits.....	24
III.4.1	Alimentation en eaux usées des LSP.....	24
III.4.2	Alimentation en boues de vidange des LSP/LSnP	26
III.4.3	Méthodologie d'alimentation des lits en BV.....	27
III.4.4	Détermination de la charge de boues	28
III.5	Elaboration de la cartographie.....	29
III.6	Production du charbon de bambou.....	29
III.7	Caractérisation du charbon.....	30
III.8	Caractérisation physico-chimique des boues de vidange brute.....	31
III.9	Caractéristiques physique des boues de vidange brute	33
IV.	RESULTATS ET DISCUSSION.....	34
IV.1	Cartographie de la provenance des boues de vidange.....	34
IV.2	Production et caractérisation du charbon	35
IV.2.1	Rendement du produit de la pyrolyse	35
IV.2.2	Caractéristiques du charbon	36
IV.3	Caractéristiques des boues de vidange brute.....	38
IV.3.1	Caractéristiques physique de BV brute	38
IV.3.2	Caractéristiques physico-chimique et microbiologique des boues de vidange....	38
IV.3.3	Effet du charbon de bambou sur la salinité des BV	44
IV.4	Evaluation du biosolide.....	45
IV.4.1	La hauteur du biosolide sur les lits.....	45
IV.4.2	Caractéristiques physiques du biosolide	45
IV.4.3	Caractéristiques physico-chimiques du biosolide	47
IV.4.4	Qualité hygiénique du biosolide	51
IV.5	Abattement des quelques paramètres physico-chimiques et microbiologiques.....	52
V.	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	53
V.1	CONCLUSION	53
V.2	RECOMMANDATIONS	54
VI.	BIBLIOGRAPHIE	55
ANNEXES		59

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I:Caractéristiques des BV dans quelques villes.....	10
Tableau II : Critères de choix d'une option de traitement (Reymond, 2008)	12
Tableau III : Quelques performances du traitement des boues de vidange par filtre planté dans le monde	17
Tableau V: granulométrie du massif filtrant	21
Tableau VI: Caractéristique des eaux usées pendant la phase d'acclimatation	25
Tableau VII : Les différentes méthodologies d'alimentation des lits en BV.....	27
Tableau VIII : Détermination des charges appliquées	29
Tableau IX : Méthode de Caractérisation du charbon (Annexe 3 pour plus de détails)	30
Tableau X: Méthodes de caractérisation des BV (Annexe 2 pour plus de détails).....	32
Tableau XI: Relation de calcul des paramètres physiques de BV brute	33
Tableau XII : Caractéristiques du charbon de bambou produit à 500°C	36
Tableau XIII: Caractéristiques physique des BV brutes	38
Tableau XIV: Caractéristiques physico-chimique des BV. n : Nombres d'échantillons	39
Tableau XV: Hauteurs du biosolide sur les lites	45
Tableau XVI : Caractéristiques physiques du biosolide	46
Tableau XVII : Caractéristiques physico-chimiques du biosolide (n : 36).....	48
Tableau XVIII : Nombre œufs d'helminthe dans les boues déshydratées après trois mois	51
Tableau XIX : Abattements des paramètres physico-chimiques et microbiologiques.....	52

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Le déversement sauvage des boues de vidange dans la nature.....	8
Figure 2: Exposition des enfants aux boues de vidange.....	8
Figure 3: Utilisation de boues de vidange non traitées dans les champs.	8
Figure 4 : schéma des options de traitement des boues de vidange (Klingel et al., 2002).....	13
Figure 5: Zone de l'étude.....	20
Figure 6 : Plate-forme servant de support	20
Figure 7: Matériaux de garnissage	22
Figure 8: Coupe du massif filtrant.....	22
Figure 9: Dispositif d'aération.....	23
Figure 10: Bambousa Vulgaris déjà acclimaté aux eaux usées.....	26
Figure 11 : Dépôt de boues dans le système	26
Figure 14 : Dépôt de boues dans le système	27
Figure 12 : Réception des boues de vidange sur le site.....	27
Figure 13: Bambou pendant la phase d'alimentation en BV	27
Figure 15: Schéma des lits expérimentaux.....	28
Figure 16 : Production du charbon par pyrolyse lente à 500°C	30
Figure 17: Cartographie de la provenance des BV	34
Figure 18 : Rendement de la production de charbon en fonction de la température.....	35
Figure 19: Evolution de la température dans le réacteur.....	36
Figure 20 : Images à balayage microscopique électronique du charbon.....	37
Figure 21 : caractéristiques physiques de boues brutes	40
Figure 22: caractéristiques physiques des boues brutes	41
Figure 23 : Caractéristiques chimiques des BV brutes	42
Figure 24 : Caractéristiques chimiques des BV brutes	43
Figure 25 : Caractéristiques microbiologiques des BV brutes.....	44
Figure 26 : L'effet du charbon sur la salinité des BV	44
Figure 27: Evaluation de la matière sèche en fonction des traitements	46
Figure 28 : Evaluation de l'humidité en fonction des traitements	46
Figure 29 : Evaluation des paramètres physiques par traitements	49
Figure 31 : Caractéristiques physiques et microbiologiques des biosolides	50

I. INTRODUCTION

Selon le rapport commun OMS/UNICEF(JMP, 2017) 2,3 milliards de personnes ne disposent toujours pas d'installations sanitaires de base. Parmi elles, 892 millions défèquent à l'air libre, une pratique en augmentation en Afrique subsaharienne et en Océanie à cause de la forte croissance démographique. Par ailleurs, the Boston Consulting Group souligne que les besoins en assainissement de plus de 2,7 milliards de personnes dans le monde sont couverts par des dispositifs d'assainissement autonome (BCG, 2013). Ce chiffre devrait atteindre 5 milliards d'ici 2030. En Afrique Subsaharienne, ce sont 65% à 100% de l'accès à l'assainissement en milieu urbain qui sont assurés par des systèmes d'assainissement autonome (Strauss et al., 2000). Cependant, bien qu'un grand nombre d'habitants des villes des pays en développement utilisent des dispositifs d'assainissement à la parcelle, il n'existe généralement pas de filière de gestion des boues de vidange (Strande et al., 2014). En effet, les boues vidangées sont très souvent déversées à côté des habitations, dans les rues, les caniveaux et autres espaces vides, exposant les populations à des risques sanitaires et environnementaux considérables (Koanda, 2006). Actuellement, un enfant sur cinq meurt de maladies diarrhéiques, ce qui est supérieur aux décès cumulés engendrés par le sida, le paludisme et la rougeole (UNICEF et OMS, 2009). Pour améliorer la situation sur le terrain, l'agenda 2030 des Nations Unies pour le développement durable, adopté en 2015, a pris acte du rôle central de l'assainissement dans le développement durable en s'engageant à garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable à l'horizon 2030¹.

Au Burkina Faso, depuis 2016, le secteur de l'assainissement est régi par un nouveau programme, le Programme National-d 'Assainissement des Eaux Usées et Excréta (PN-AEUE) élaboré dans le cadre des Objectifs de Développement Durable (ODD). A la différence des programmes antérieurs qui se sont focalisés sur l'accès des ménages aux ouvrages, le PN-AEUE met l'accent sur la toute la chaine de l'assainissement avec son objectif spécifique 3 qui vise à optimiser la gestion et la valorisation des eaux usées et boues de vidange dans une perspective de protection environnementale et sociale.

En milieu urbain, l'assainissement est mis en œuvre par l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA). Pour mener à bien ce rôle, l'ONEA élabore et met en œuvre des

¹ Objectif 6 des Objectifs de Développement Durable

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

plans stratégiques d'assainissement (PSA) dans les centres urbains du pays à travers la réalisation station de traitement des eaux usées et des boues de vidange. Les stations de traitements des boues vidange déjà réalisées par l'ONEA sont de types lits de séchage non-plantés avec un fonctionnement difficile du fait des problèmes de colmatages récurrents et des rendements mitigés. Les travaux de recherches menés par Kouawa et al. (2015) sur les lits de séchage plantés dans le contexte sahélien en utilisant deux espèces de macrophytes indigènes (*Oriza longistaminata* et *Sporobolus pyramidalis*) ont montré un flétrissement total des deux espèces de macrophytes en raison des conditions difficiles (Les teneurs élevées en DCO, en nutriments et en salinité pourraient être particulièrement associé au flétrissement et à la mort des plantes) de contamination des plantes par les boues de vidange. À cet égard, il est donc important de développer des approches innovantes susceptibles de contribuer à réduire la forte contamination par les boues pour la survie des espèces de macrophyte dans le système. Une étude antérieure réalisée par Kuffour (2009) a révélé que l'ajout de sciure de bois aux conditionnements physiques des boues de vidange permet de réduire efficacement le temps de déshydratation. La présente étude s'intègre dans ce cadre avec pour objectif général le traitement des boues de vidange par le système de lit de séchage planté construit à l'échelle pilote en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique. De façon spécifique il s'agit de :

- Cartographier les sources et caractériser des boues de vidange brutes fournies par les vidangeurs à l'expérience pilote.
- Produire et caractériser le charbon en utilisant le bambou comme matière première dans des conditions optimisées de pyrolyse lente pour le conditionnement des boues.
- Evaluer les effets du conditionnement des boues sur les propriétés de déshydratation, physico-chimiques et microbiennes du résidu accumulé dans le système.

Pour atteindre ses objectifs, nous avons formulée les hypothèses suivantes :

- Les diverses sources de boues de vidange brutes ont un impact sur leurs caractéristiques avant et après l'application au système.
- Les caractéristiques du charbon de bambou conviennent au conditionnement des boues de vidange.
- La qualité du résidu conditionné par le charbon de bambou est bien améliorée et est dans les limites autorisées pour la réutilisation en agriculture.

II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1 Problématique des boues de vidange en Afrique Subsaharienne

Dans les villes africaines, en particulier celles d'Afrique subsaharienne, les excréta sont recueillis dans des systèmes d'assainissement individuels installés au niveau même des habitations (STRAU et al., 2006). Les installations d'assainissement non collectif sont essentiellement constituées de latrines (latrines traditionnelles, latrines améliorées) et fosses septiques auxquelles on associe les puits d'infiltrations. Les services techniques de l'Etat ne disposent pas des moyens techniques et financiers suffisants ainsi que de ressources humaines qualifiées pour faire face de manière efficace aux problèmes.

Les populations se trouvent alors face des problèmes tels que :

- Une pollution de l'environnement causée par les boues de vidange déversées autour des concessions;
- Les nuisances causées par le déversement non contrôlé et sans traitement dans l'environnement d'importantes quantités de boues de vidange (figure 1) ;
- Les risques sanitaires liés à la réutilisation de boues de vidange non traitées en agriculture (figure 2 et figure 3).

Face à cette situation, des initiatives ont été prises par plusieurs pays comme le Burkina Faso. Malheureusement, en ce qui concerne le dernier maillon de la filière de gestion des boues de vidange (traitement et valorisation), il n'existe pas de méthodologie à la disposition des planificateurs et des ingénieurs pour le choix et la conception d'une option durable de traitement, si bien que les quelques stations existantes ne fonctionnent pas avec les performances attendues.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.



Figure 1: Le déversement sauvage des boues de vidange dans la nature (ONEA, 2006).



Figure 2: Exposition des enfants aux boues de vidange (ONEA, 2006)



Figure 3: Utilisation de boues de vidange non traitées dans les champs (ONEA, 2006).

II.2 Typologie des boues de vidange

Le choix d'une option de traitement des BV dépend principalement des caractéristiques des boues générées dans une ville ainsi que des objectifs de traitement (réutilisation agricole, mise en décharge des biosolides, déversement des liquides traités dans des cours d'eau récepteurs) (Koné et Strauss., 2004).

Les facteurs principaux influençant la qualité des BV sont les suivants (Heinss et al., 1999) :

- ❖ le type d'installation (latrines, fosses septiques) : il influe sur l'état des boues. Les boues des latrines (traditionnelles, VIP) par exemple sont plus compactes et difficiles à extraire par les camions de vidange. Par contre pour les autres types de latrines où on utilise beaucoup plus d'eau, les boues sont assez liquides et facilement vidangeables;

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

- ❖ la fréquence de vidange : selon le temps de retour des vidanges, les microorganismes disposent d'un temps assez long ou pas pour dégrader une bonne proportion des matières organiques. Les boues de fosses septiques sont biochimiquement plus stables car leur durée de stockage est plus longue que celle des boues de toilettes publiques, vidangées à intervalle de quelques semaines seulement (Koné et Strauss., 2004) ;
- ❖ la composition des BV : en fonction de l'emploi fait par les utilisateurs de l'installation, la composition des boues diffère (utilisation de produit chimique et de détergents, rejet de déchets solides, présence ou non de graisses, de déchets alimentaires, ...). Cela peut avoir un impact sur la filière de traitement à adopter ;
- ❖ le mode de vidange : selon le mode de vidange manuelle ou mécanique, les boues sont respectivement non diluées ou très diluées ;
- ❖ le climat : la température joue sur l'activité des micro-organismes.

Le tableau I ci-dessous récapitule les caractéristiques des BV de quelques villes.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Tableau I:Caractéristiques des BV dans quelques villes

Paramètres	(Koottatep et al., 2005)	SIBEAU	(Mahamane, 2011)	(Koné et Stauss, 2004)		(Kengne, 2006)	(Kouawa et al., 2015)	(Berteigne, 2012)		(Koffi, 2016)
Pays (climat)	Thaïlande	Cotonou	Ouagadougou		Accra	Yaoundé	Ouagadougou	Yaoundé	Douala	Abidjan
	Moyenne (min-max)	Moyenne	Moyenne		Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)	Moyenne (min-max)
DCO (mg/L)	15700 (1108 - 76075)	8400	11973	1350	49000	31100	3157	4406 (946 - 23610)	2972 (66 - 13050)	60 000 - 65 000
DBO 5(mg/L)	2300(630 - 5550)	1740	1981	2240	7600	-	-	731 (100 - 2580)	1233 (20 - 3700)	14 400 - 15 600
MS (mg/L)	15350 (2 202 - 67 200)	-	12 919	19000	52500	33400 (3300-130000)	6233	11600 (200 - 74200)	30410 (400-168000)	32 000 - 50 000
MVS mg/L	9 250 (840 - 34667)	-	7840	-	-	-	-	-	-	-
NTK (mg/L)	1 100 (226 - 4880)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH₄⁺ (mg/L)	-	-	1230 (146-2914)	-	-	600 (80-3300)	-	172(16 - 475)	315(0,4-1218)	1 700
PO₄³⁻ (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	140 (0,81- 493)	764 (7-3437)	-
pH	7,5 (6,7 - 8,1)	8,12	-	-	-	7,6	8,6			6 - 8
CF	-		-	-	-	-	1,5.10 ⁵	2,11.10 ⁶	1,65.10 ⁶	-
Œufs d'helminthe	-	-	-	-	-	-	413	5392	12885	-

II.3 Traitement des Boues de vidange

Le traitement/valorisation des eaux usées et excréta constitue le troisième et dernier maillon de la filière d'assainissement. Ce maillon assure le traitement des eaux usées et excréta après leur évacuation hors du domicile des ménages, en vue de réduire les risques sanitaires et les pollutions sur l'environnement.

En Afrique de l'Ouest, les stations de traitement des BV sont très rares. Seulement quelques villes telles que Ouagadougou, Bobo-Dioulasso et Dori au Burkina Faso, Cotonou au Bénin, Accra et Kumasi au Ghana, Bamako au Mali, Dakar et KeurMassar au Sénégal disposent de stations de traitement de vidange avec des performances diverses. Ces stations sont gérées par les municipalités ou les agences gouvernementales de promotion de l'assainissement, à l'exception des cas de Bamako et Cotonou financées par des fonds privés. Les frais d'exploitation de ces stations sont financés en partie par une redevance payée par les vidangeurs à chaque déversement.

Dans la ville de Cotonou, 84% des boues générées sont disposées sans traitement. La seule installation d'étangs de stabilisation existante (bassin de sédimentation + lagunage), gérée par une entreprise privée SIBEAU, est surchargée ; l'effluent est médiocre (jusqu'à 2250 mg/l de DBO₅) et ne respecte pas toujours les normes de qualité (Hounkpe et al., 2014).

Pour réduire les impacts sanitaires et écologiques de des dépôts sauvages de boues de vidange au Burkina Faso, deux stations de traitement des BV pouvant recevoir 205 m³/j ont été mises en service en septembre 2014 à Kossodo et Zagtoui, deux quartiers périphériques de Ouagadougou (Kouawa et al., 2016). Ces stations sont constituées de lits de séchage non plantés suivis de bassins de lagunage pour le traitement du percolât issu du traitement des boues avec les eaux usées et le séchage naturel des boues résiduelles (Kone et al., 2016). Ce même type de traitement est également mis en place à Bobo-Dioulasso et à Dori toujours au Burkina Faso. En Afrique subsaharienne, les recherches en cours relatives au traitement des BV portent sur les lits de séchage plantés au Cameroun, les lits de séchage non plantés et le Co-compostage au Ghana, la comparaison des filières de traitement et les lits de séchage plantés au Sénégal (Koanda, 2006).

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

II.4 Critères de choix d'une option de traitement

Selon Reymond (2008), Defo et al. (2015) et Akpaki et al. (2016), les critères de choix peuvent être classés selon trois catégories : critères de performance, critères de simplicité et de robustesse du procédé, critères liés aux coûts. Les différents critères sont résumés dans le Tableau II.

Tableau II : Critères de choix d'une option de traitement (Reymond, 2008)

Critères de performance	Critères de simplicité et robustesse du procédé	Critères liés aux coûts
Consistance et stabilité biochimique des biosolides obtenus	Besoins d'opération et de maintenance	Superficie nécessaire
Qualité hygiénique des biosolides	Compétences requises pour l'opération et la supervision	Coûts d'investissement
Qualité de l'effluent	Risques d'échec dus aux installations ou à des mesures de gestion ou de procédure	Coûts d'opération et de maintenance

Selon Bigumandondera (2014), les critères qu'il faut prendre en compte pour choisir une technologie de traitement des boues de vidange sont : les besoins énergétiques nécessaires pour faire fonctionner les ouvrages, la surface nécessaire pour l'implantation des sites de dépôtage/ traitement et les possibilités de valorisation des boues de vidange.

II.5 Les traitements des boues de vidange existants

Selon Klingel et al. (2002), les boues de vidange exigent un traitement qui leur est propre. En effet elles sont trop riches en polluants, trop liquides et contiennent trop de pathogènes pour être déversées dans les eaux de surface, être mises en décharge comme déchets solides ou encore pour être utilisées directement pour la fertilisation des champs. La Figure 4 présente les systèmes de traitement des boues de vidange à faible coût et leurs combinaisons possibles.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

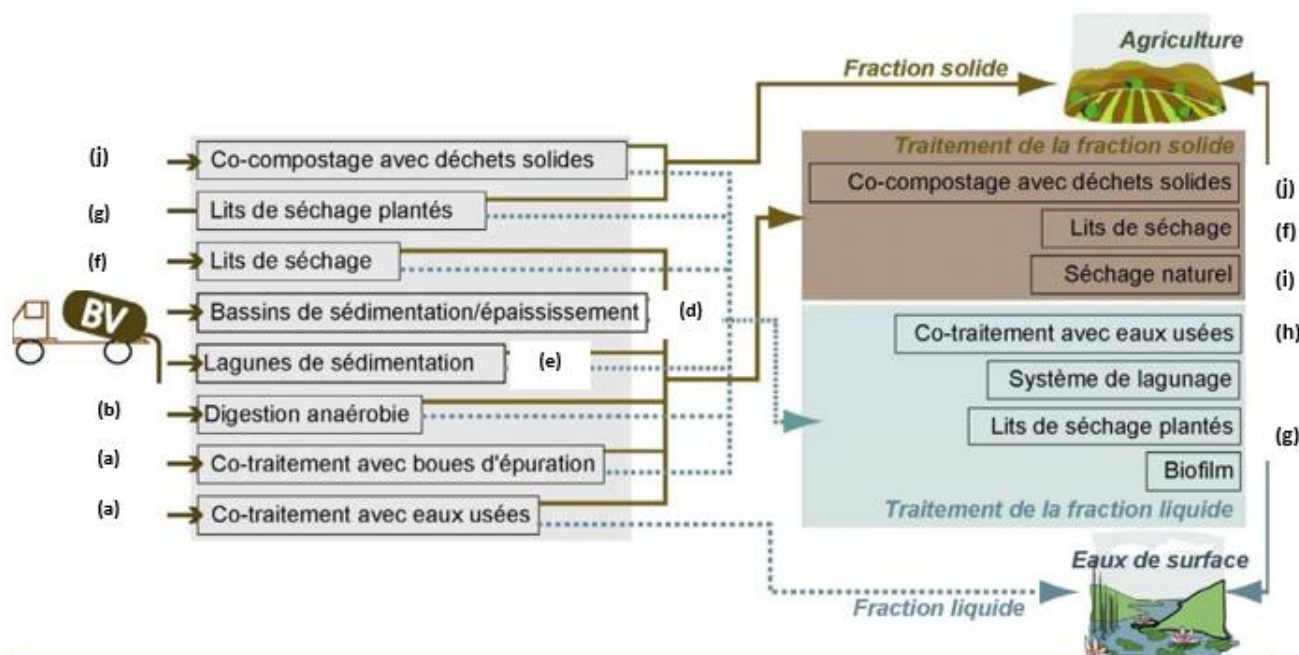


Figure 4 : schéma des options de traitement des boues de vidange (Klingel et al., 2002)

Si la ville dispose d'un réseau de collecte des eaux usées et qu'une station d'épuration (STEP) est prévue, on peut envisager de traiter les boues de vidange avec les eaux usées (Co-traitement des boues de vidange fraîches avec des eaux usées ou des boues d'épuration). Il faut s'assurer que la STEP dispose d'une capacité suffisante pour accueillir les BV. Dans ce cas, les boues de vidange se mélangent à des boues d'épuration ou des eaux usées d'avantage chargées en polluants chimiques, ce qui peut limiter une valorisation agricole.

Si l'on décide de traiter les boues de vidange séparément, le processus commence par un traitement primaire par la stabilisation des boues de vidange et la séparation des phases solide et liquide. Un post-traitement de la fraction solide et/ou liquide peut être nécessaire à l'atteinte des objectifs de traitement fixés.

Comme l'indique la Figure 4, le traitement primaire peut être de différents types : **Digestion anaérobie avec production de biogaz** : La digestion des BV avec production de biogaz peut être une option intéressante s'il existe un potentiel d'écoulement du biogaz. Seules les BV fraîches (issues de toilettes publiques par ex.) se prêtent mieux à la production de biogaz.

Décanteur-digester : Le décanteur digesteur peut être utilisé pour la décantation et la digestion simultanée des BV insuffisamment stabilisées. Il peut être utilisé quand les conditions ne sont pas favorables au fonctionnement d'un digesteur avec production de biogaz et quand le site n'offre pas suffisamment d'espace pour des étangs de stabilisation.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Bassins de sédimentation/épaississement : Les bassins de sédimentation conviennent au traitement des BV partiellement stabilisées comme celles provenant de fosses septiques ou de la plupart des autres systèmes d'assainissement.

Etangs de sédimentation/stabilisation : Les étangs de sédimentation/stabilisation peuvent servir au traitement primaire des BV lorsque la station dispose de suffisamment d'espace et que les BV sont fraîches.

Lits de séchage non plantés : Les lits de séchage sont constitués d'un filtre à gravier/sable équipé d'un système de drainage. Ils peuvent être utilisés en première ou en deuxième étape de traitement pour la déshydratation des boues décantées issues de systèmes de sédimentation. Les lits de séchage ne peuvent accueillir les BV fraîches non diluées (mauvaise déshydratation, odeurs).

Lits de séchage plantés (*filtres plantés*) : Les lits plantés à écoulement vertical sont des lits de séchage à filtre de sable et de graviers drainés dans lesquels croissent des plantes marécageuses. Les lits de séchage plantés sont préconisés lorsqu'une valorisation agricole est envisagée.

A la fin du traitement primaire, les fractions liquide et solide sont séparées et peuvent être traitées de manière distincte, s'il y a besoin de post-traitement. Le post-traitement de la fraction liquide permet de produire un effluent final pouvant être déversé dans les eaux de surface sans inconvénient pour la santé et l'environnement. On en distingue deux types :

Co-traitement des liquides et des eaux usées : Un traitement conjoint des effluents du traitement primaire des BV et des eaux usées peut être envisagé si une station d'épuration est en place ou prévue.

Bassins/étangs de stabilisation : Le lagunage est une bonne solution quand la station dispose d'un espace suffisant. Les fortes teneurs en ammonium de certains effluents, notamment des BV issues des toilettes publiques, peuvent inhiber la croissance des algues et bactéries et donc nuire au bon fonctionnement du système.

Le **post-traitement de la fraction solide** a pour mission de lui conférer une qualité finale correspondant aux objectifs de traitement fixés. En particulier, si l'on souhaite valoriser les BV en agriculture, ce traitement devra assurer leur hygiénisation. On en distingue trois types :

Lits de séchage comme décrit plus haut.

Co-compostage avec les ordures ménagères : Le compost obtenu est un excellent produit pour l'amendement des sols. Le compostage est une solution très intéressante quand une

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

valorisation agricole des boues de vidange et des déchets est envisagée.

Stockage et séchage naturel : Le stockage et le séchage naturel sont préconisés lorsqu'une valorisation agricole des boues de vidange est souhaitée et que le recours au co-compostage n'est pas envisageable.

II.6 Réutilisation des BV déshydratées dans l'agriculture

Le co-compostage : Le co-compostage pourrait être défini comme une combinaison de différents déchets au départ en vue d'avoir des conditions optimales pour la croissance des micro-organismes qui aideront à obtenir un compost de qualité améliorée. Dans ce sens, le co-compostage est inhérent à tout véritable compostage et il est présent dans tous les processus de compostage (Sánchez et al. 2015).

Qualité hygiénique du compost : La qualité hygiénique du compost décrit la teneur dans le compost en agents pathogènes pour les hommes, les animaux et pour les plantes. La recherche des coliformes et streptocoques fécaux ainsi que des parasites tels les œufs d'helminthes, les kystes, les salmonelles... dans le compost donnent une idée de sa qualité hygiénique. L'élévation de la température pendant le processus de compostage est le facteur déterminant pour la qualité hygiénique du compost. Pour la destruction des germes pathogènes et des parasites présents dans les déchets, une température de 55°C pendant cinq (5) jours consécutifs est nécessaire (Charnay 2005).

II.7 Les lits de séchage (LS)

II.7.1 Les lits de séchage non plantés (LSnP)

Un LSnP est un lit simple et perméable qui, une fois chargé avec la boue, draine la partie liquide et permet à la boue de sécher par évaporation. On estime à environ 50 à 80 % la fraction du volume initial qui s'infiltre et est évacué du lit (percolât), selon les caractéristiques des BV entrantes. Cependant, la boue n'est pas stabilisée (Tilley et al., 2008). Les boues de vidange brutes ou pré-épaissies sont chargées sur le lit et l'eau qu'elles contiennent s'évacue dans sa majorité par percolation à travers le filtre et le reste par évaporation (Klingel et al., 2002). Dans ce principe, le processus de séchage est double : drainage de la partie liquide libre à travers le sable et le gravier vers le fond du lit et évaporation de l'eau restante dans l'air. La conception ainsi que le fonctionnement du lit de séchage sont assez simples, mais

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

nécessitent un choix de charge admissible adapté ainsi qu'une bonne répartition hydraulique des boues sur la surface du lit. Ce principe est basé sur la sédimentation, l'évaporation et l'infiltration (Miss, 2007). Après avoir atteint le niveau de déshydratation souhaité, les boues doivent être retirées du lit, ce qui se fait manuellement ou à l'aide d'un engin motorisé. Un stockage supplémentaire permet la réduction des agents pathogènes, si cela est rendu nécessaire pour la réutilisation ultérieure des matières. Ce type de traitement est intéressant pour sa relative facilité d'utilisation et son faible coût, mais nécessite une emprise foncière importante.

II.7.2 Lits de Séchage Plantés (LSP)

Les lits de séchage plantés de macrophytes ont pour objectif de stabiliser la matière organique et de réduire le volume des boues afin de faciliter leur transport et leur disposition. Ils sont souvent considérés comme une variante des marais filtrants à écoulement vertical sous-surfacique puisqu'ils se composent principalement des mêmes éléments, à savoir; un massif filtrant reconstitué de granulométrie croissante de la surface vers le fond du filtre, des macrophytes aquatiques plantés à la surface du filtre dans un substrat adéquat (compost ou sable), Un système d'alimentation permettant l'apport direct de la boue à la surface du massif, Une hauteur de revanche permettant un stockage de la boue sur le long terme (1 m maximum), Un système de drainage permettant la collecte des eaux de drainage (percolât), Un système d'aération permettant le maintien de conditions aérobies essentielles à la minéralisation de la matière organique. En plus d'améliorer la déshydratation de la boue, la présence des végétaux favorise le développement de macroorganismes (i.e. lombrics, invertébrés et larves d'invertébrés, etc.) et de microorganismes (ex. bactéries, champignons), créant ainsi un écosystème qui, comme dans un sol de forêt, va amorcer la stabilisation de la matière organique suivant les processus de minéralisation et d'humifications.

Le principe de fonctionnement des LSP est relativement simple et repose sur l'apport de boue par bâchée, à la surface du massif filtrant. Sous l'effet des forces de gravité l'eau contenue dans la boue s'écoule à travers le massif jusqu'aux drains de collecte. Les matières en suspension, quant à elles, sont retenues à la surface du massif et constituent un dépôt de boue. La matière organique du dépôt ainsi formée est alors progressivement minéralisée par l'action des microorganismes en présence. Par ailleurs, l'évapotranspiration par les macrophytes améliore la déshydratation du dépôt obtenu par simple drainage de l'eau et permet ainsi

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

d'atteindre des pourcentages massiques de matière sèche supérieurs à 20 %. En résumé, les mécanismes de traitement impliqués dans les LSP sont les suivants : **la déshydratation et la minéralisation** :

- ✓ **La déshydratation** de la boue par le drainage de l'eau à travers le substrat et par l'évapotranspiration ;
- ✓ **La minéralisation** de la matière organique induite par l'activité biologique aérobie au sein du dépôt de boue.

L'efficacité de ces deux mécanismes repose essentiellement sur l'activité biologique (des macrophyte via l'évapotranspiration et des microorganismes via la minéralisation), elle-même fortement tributaire du climat. En termes de fonctionnement, l'efficacité des LSP étant essentiellement due à l'activité des plantes et des microorganismes, il faut laisser le temps aux processus biologiques de se réaliser. Aussi, deux phases de fonctionnement caractérisent les LSP. Dans la phase d'alimentation, la boue est apportée à la surface du filtre et entraîne la formation du dépôt. Vient ensuite la phase de repos au cours de laquelle le dépôt sèche et se stabilise sous l'effet de l'activité biologique. L'essentiel du traitement a lieu lors de la phase de repos, qui dure habituellement au moins 3 semaines. L'alternance entre ces deux phases impose la mise en place de plusieurs unités de traitement (lits de séchage) en parallèle. Le nombre de lits à mettre en place dépend directement de leur taille et de la quantité de boue à traiter. Le tableau III donne quelques performances des lits de par le monde.

Tableau III : Quelques performances du traitement des boues de vidange par filtre planté dans le monde

Pays	Charge appliquée	Performances	Macrophytes utilisés
France (Molle 2003; Molle, A. Liénard et al. 2004)	~70 (kg MS/m ² /an)	85%MS ; 70% DCO ; 79% NT ; 42%N-NH ₄ ⁺	<i>Phragmites australis</i>
USA (Schaafsma, Baldwin et al. 2000)	9,8-65 (kg MS/m ² /an)	95%DCO ; 99%MES ; 90%NTK ; 42%N-H ₄ ⁺	<i>Phragmites australis</i>
Thaïlande (Koottatep, Surinkul et al. 2005)	250 (kg MS/m ² /an)	74-86%MS ; 78-99% DCO ; 70-99%NTK ; 50-99% NH ₃ ⁺	<i>Typha latifolia</i>

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Cameroun (Kengne, Akoa et al. 2008)	100-300 (kg MS/m ² /an)	78% NH ₄ ⁺ ; 88%MS ; 92%MES ; 98%DCO	<i>Echinochloa pyramidalis</i> <i>Cyperus papyrus</i>
Sénégal (Abiola 2009)	13-283 (kg MS/m ² /an)	97%MS ; 99%MES ; 100%MVS ; 99%DCO ; 91%NH ₄ ⁺ ; 97%PO ₄ ³⁻	<i>Echinochloa pyramidalis</i>

(Shurstine, 2010)

III. MATERIELS ET METHODES

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette étude se sont faits autour d'une approche expérimentale. Cette approche expérimentale visait à apprécier le potentiel de déshydratation de boues de vidange de Ouagadougou par lits de séchage dans un contexte climatique sahélien. L'objectif de cette partie est de présenter les matériels et méthodes utilisés pour réaliser ses travaux.

III.1 Dispositif expérimental

L'approche expérimentale a consisté à la conception et au suivi d'un dispositif expérimentale constitué d'unités de pilotes de lits de séchage (plantés et non plantés). La mise en place du dispositif s'est inspirée des travaux de Kouawa (2016).

III.2 Zone d'étude

Les travaux expérimentaux se sont déroulés à Ouagadougou à l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), sur le site de la station d'épuration (STEP) des eaux usées du campus de cet institut (figure 5). Le système de traitement des eaux usées du campus de 2iE à Ouagadougou est un système de lagunage naturel constitué de 3 bassins (Anaérobie, Facultatif et de Maturation). La ville de Ouagadougou est sous climat soudano-sahélien avec une saison sèche assez longue (Octobre à Mai). La saison pluvieuse s'étend de Juin à Septembre (4 mois). Sur la base des données des services météorologique de Burkina Faso, les températures minimales moyennes varient de 17,4°C en Janvier à 27,2°C en Avril, tandis que les températures maximales moyennes varient de 31,4°C en Aout à 39,8°C Avril. L'évapotranspiration de référence moyenne est de 6,0mm/jour correspondant à une moyenne annuelle de 2712mm/an. Le mois de Mars est le mois durant lequel la demande évaporative est maximale avec une moyenne journalière de 7.7mm/jour (Données de Météo de 2004 à 2009).

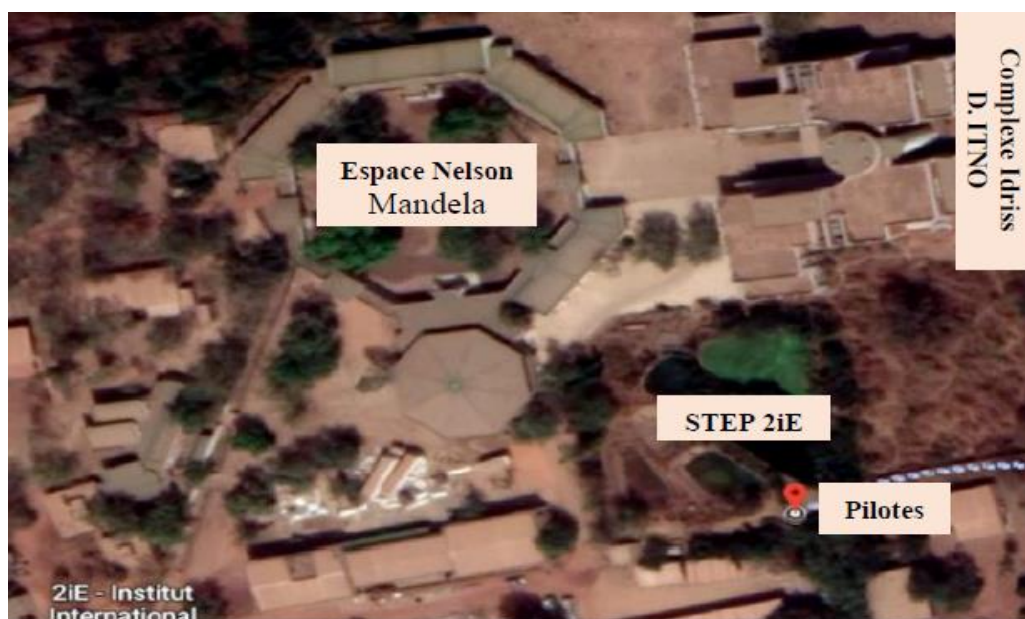


Figure 5: Zone de l'étude

III.3 Description du dispositif expérimental

III.3.1 Les supports

Les supports (figure 6) de ces dispositifs expérimentaux sont des briques pleines disposées de telle sorte à couvrir la surface entière des pilotes expérimentaux. les supports ont une hauteur de sorte à permettre l'écoulement gravitaire du percolât du fond de cuve vers les futs de 200L prévu à cet effet. De plus, les briques reposent sur du béton d'environ 30cm de côté servant de fondation et destiné à éviter un enfoncement des ouvrages dans la terre, particulièrement en saison des pluies.



Figure 6 : Plate-forme servant de support

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

III.3.2 Installation du pilote

Le système est constitué de :

- 14 cuves graduées en PEHD de 1,08m³ chacune (cuves de 1,2m de longueur, 1m de largeur et de 0,9m de hauteur) servant de lits de séchage ;
- 10 futs de 260 litres chacun et de 04 futs de 50 litres, servant à recueillir le percolât.
- 5 cuves graduées en polyéthylène haute densité (PEHD) servant de réservoir de stockage des boues de vidange d'une contenance totale de 11 m³

III.3.3 Matériaux de garnissage des lits de séchage

Les LSP sont remplis d'un massif filtrant composé de trois couches de matériaux de granulométrie variable (Tableau IV). De la surface vers la base du filtre on trouve :

- Une couche de 25 cm de sable,
- Une couche de 15cm de graviers fins ;
- Une couche de 20 cm de gros gravier.

La caractérisation du matériau filtrant a été réalisée au laboratoire de génie civil de 2iE. En ce qui concerne le sable utilisé, un échantillonnage a été prélevé sur trois sites de vente de sable de la ville de Ouagadougou afin de déterminer la granulométrie la plus proche de celle utilisée par Kouawa (2015) considéré comme la référence à notre travail. Cette analyse a abouti au choix du sable que nous avons utilisé. Le reste des matériaux est similaire à celui utilisé par Kouawa (2016). Le sable a un coefficient de conformité de 2,5 ($CU = 2,5$) et un $d_{10} = 0,27$ mm et de fine inférieures à 3%. L'analyse granulométrique a été faite par tamisage selon la norme NF P 18-560. Le poids spécifique des grains a été déterminé au pycomètre à air, la densité apparente par la méthode de l'entonnoir et le coefficient de perméabilité du sable au permeamètre à charge constante selon la norme NF P 94-512-11. Les deux matériaux de litière (sable et gravier) ont été soigneusement lavés avant le remplissage.

Tableau IV: granulométrie du massif filtrant

	Diamètre des grains (mm)	masse volumiques (kg/l)	densité apparente (kg/l)	perméabilité (m/s)
sable	0/6,3	2,68	1,56	$7,22 \cdot 10^{-4}$
Gravier fin	3,3/16	2,7	1,32	
Gravier grossier	20/25	2,7	1,32	

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.



Figure 7: Matériaux de garnissage

La figure 7 ci-dessus présente les matériaux de garnissage utilisé et la figure 8 montre la coupe du massif filtrant des pilotes de LSP

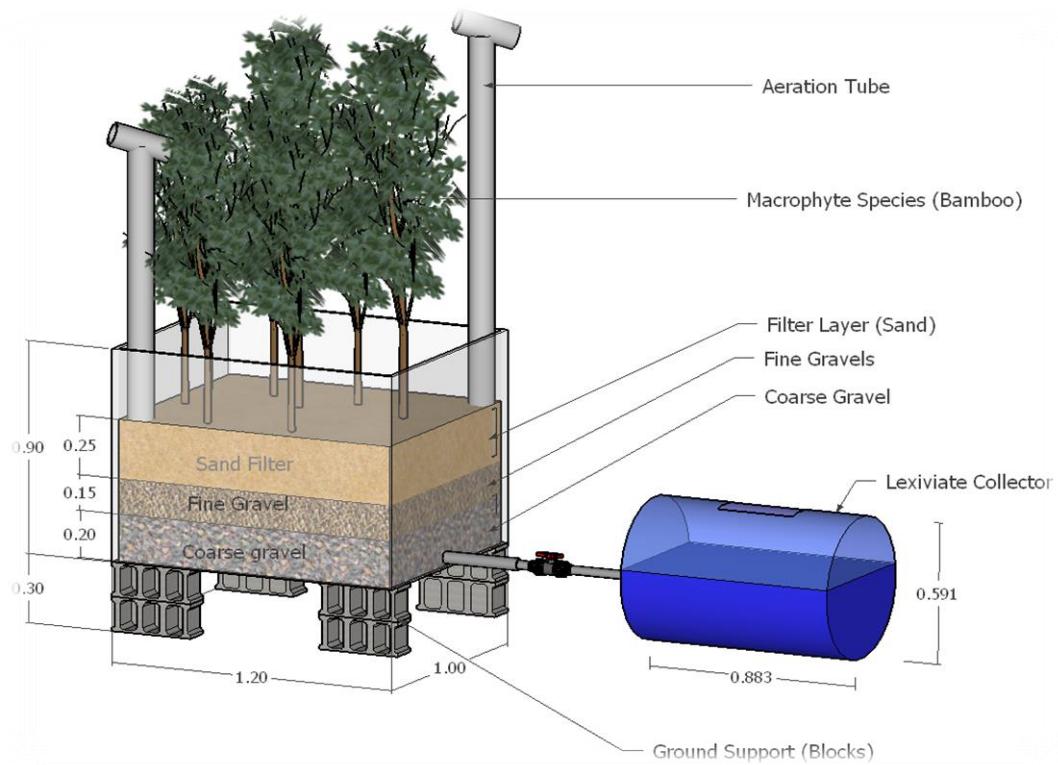


Figure 8: Coupe du massif filtrant

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

III.3.4 Dispositif d'aération et de drainage

Le dispositif d'aération est composé de deux canalisations de diamètre 100 mm en PVC dont les génératrices inférieures sont découpées avec des fentes de 20 mm de large espacées de 50 mm. Celui-ci est installé dans le dispositif filtrant (Figure 9). L'assemblage a été réalisé par emboîtement et collage pour les travaux de recherches de Kouawa et al. (2015). Ces canalisations sont placées dans la diagonale des cuves et sont espacées de 300 mm puis reliées par deux cheminées de tailles différentes pour faciliter l'aération (flux d'air) à l'intérieur du massif filtrant avec une différence de hauteur de 50 cm. Pour le drainage des percolât, une conduite en PVC de diamètre 63 mm équipée d'une vanne à opercule est reliée à un fût d'environ 260 litres pour recueillir le percolât a été installée. L'un des inconvénients de ces lits de séchages expérimentaux pourrait être la faible isolation thermique de ses parois. La figure 9 montre le dispositif d'aération utilisé.



Figure 9: Dispositif d'aération

- (a) : Canalisation d'aération
- (b) : Canalisation d'aération et le dispositif de drainage (Kouawa, 2016)

III.3.5 Sélection et mise en place des plantes

Les résultats d'études antérieures (Kouawa et al, 2015) dans le contexte soudano-sahélien ont montré que les espèces *Oryza longistaminata* et de *Sporobolus pyramidalis* ne sont pas adaptées pour le système LSP. Une étude de suivi menée par Osei et al (2017) a révélé un

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

potentiel d'adaptabilité de roseaux satisfaisant de quatre espèces indigènes (*Bambusa Vulgaris*, *Setaria Verticillata*, *Cymbopogon nardus* et *Typha Latifolia*) dont *Bambusa vulgaris* (bambou) fut le plus probant dans cette expérience en pot. *Bambusa vulgaris* est généralement classé parmi les espèces végétales dont la croissance est la plus rapide, avec un taux de croissance 1,2 m par mois. Un pH du sol compris entre 4,5 et 7,0 est optimal pour le développement de *Bambusa vulgaris* (Thokchom et Yadava, 2015). Il peut survivre à une large gamme de température de 8,5 ° C à 36,0 ° C. Il a une croissance rapide ce qui correspondrait à une consommation d'énormes quantités de dioxyde de carbone avec une production de quantité significative d'oxygène (35 % d'oxygène plus que d'autres plantes similaire) (Bamboo Information Network, 2011). *Bambusa vulgaris* a de nombreuses applications qui incluent son utilisation dans l'industrie du bâtiment, pour la production de divers objets ligneux et à des fins médicinales (Islam et al., 2011). L'étude menée par Osei et al (2017) a prouvé que *Bambusa vulgaris* a une bonne adaptabilité à l'acclimatation des eaux usées en raison de l'amélioration totale de ses paramètres de croissance considéré dans l'étude. Brix (2003) a expliqué que les plantes sont morphologiquement adaptées à la croissance dans les milieux humides en raison des espaces d'air internes pour le transport de l'oxygène vers les racines et les rhizomes. Zachariah et al. (2016) a également noté que les bambous ont des structures aérénchymiques qui leurs permettent généralement de séquestrer le carbone en raison de leur relatif taux de croissance élevé parmi les autres plantes. Pulavarty et Sarangi (2015), après avoir réalisé une expérience sur la tolérance au sel pour trois différentes espèces de bambou, ont mentionné que l'utilisation de cette espèce pour la gestion de la pollution pourrait avoir des avantages environnementaux et écologiques importants en raison de son utilité dans le secteur industriel. Le bambou remplit si parfaitement les critères susmentionnés qu'il en est essentiellement la seule espèce choisit pour l'étude.

III.4 Alimentation des lits

III.4.1 Alimentation en eaux usées des LSP

La première mise en eau s'est faite la veille et a consisté en la saturation du massif filtrant avec de l'eau du robinet. Cela permet d'éviter le stress hydrique aux jeunes plants nouvellement repiqués. Par la suite l'alimentation s'est effectuée par les eaux usées du bassin de maturation du lagunage naturel traitant les eaux usées du campus de 2iE dont les caractéristiques sont dans tableau V. Cette alimentation s'est déroulée en quatre phases :

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

- ✚ La première phase consistait à maintenir le massif filtrant saturé en eau usée pendant une semaine afin d'éviter aux plants un stress hydrique
- ✚ La deuxième phase a consisté à une alimentation sans stockage d'eau dans les massifs filtrant tous les jours pendant une semaine. Cette phase visait à stimuler progressivement les phases d'alimentation/ repos
- ✚ La troisième phase a consisté à une alimentation sans stockage d'eau dans les massifs filtrant tous les deux jours pendant 6 semaines
- ✚ La quatrième phase a consisté à dilué les boues de vidanges avec les eaux usées du bassin de maturation pour préparer les plants à recevoir les boues de vidanges brutes. Cette étape est une pré-acclimatation qui prépare les plantes à recevoir les BV très chargées

L'alimentation des LSP avec les eaux usées s'est faite dans un premier temps par puisage manuel avec un seau, un arrosoir et une puiette. Chaque lit a été arrosé environ de 25 litres d'eau usées par alimentation. Puis par la suite avec une motopompe. La figure 10 présente un pilote avec des Bambousa Vulgaris déjà acclimatés aux eaux usées.

Tableau V: Caractéristique des eaux usées pendant la phase d'acclimatation

Paramètres	Moy	Min	Max	δ
T (°C)	27	26,33	27,76	0,66
pH	7,61	7,5	7,75	0,1
Eh (mV)	8,63	1,5	13,4	5,17
CE (μS/cm)	416,83	381	457	29,96
Sal	0,2	0,18	0,22	0,02
Turbidité (NTU)	249,83	127	592	177,27
MES (mg/L)	69,67	50	88	12,29
MS (mg/L)	285,83	260	338	27,7
DCO (mg/L)	244,67	160	362,67	74,25
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	1,67	1,5	1,8	0,15
N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,003	0,002	0,005	0,001
N-NH ₃ (mg/L)	15,85	13,4	17,4	1,7
P-PO ₄ ³⁻ (mg/L)	7,68	6,5	9,2	1,26



Figure 10: Bambousa Vulgaris déjà acclimaté aux eaux usées

III.4.2 Alimentation en boues de vidange des LSP/LSnP

Des camions de vidange de la ville ont approvisionné le site expérimental en boues de vidange tout au long de l'étude. Les réservoirs de stockage des boues de vidange ont été alimentés par les camions de vidange 2 à 3 fois tous les deux mois. Le camion arrive sur le site et vide son contenu en remplissant un par un les réservoirs de stockage pour volume total d'environ 11m³ de BV. Cette vidange se fait à l'aide d'un tuyau reliant bouche d'évacuation du camion et l'ouverture des réservoirs déplacé manuellement d'un réservoir à l'autre (Figure 12). Après la quatrième phase d'alimentation des LSP, nous avons alimenté les lits plantés avec les BV brutes après leur caractérisation. Nous avons commencé par alimenter les LSP avec un volume constant pendant deux semaines. Le système de traitement par lits de séchage planté a été conçu pour que chaque lit de séchage puisse être alimenté avec une charge moyenne de 150 kg de MS/m².an. Cette charge correspond à la charge maximale de démarrage retrouvée dans la littérature (Kuffur et al., 2013). Nous avons évalué le volume de boues à mettre dans chaque système pendant la phase d'alimentation en fixant la charge surfacique à 150 kg de MS/m².an. Après évaluation, le volume d'alimentation en BV des lits était compris entre 15 et 380 litres de boues/lit.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.



Figure 12 : Réception des boues de vidange sur le site expérimental



Figure 13: Bambou pendant la phase d'alimentation en BV



Figure 14 : Dépôt de boues dans le système

III.4.3 Méthodologie d'alimentation des lits en BV

Le tableau VI ci-dessous montre le schéma d'alimentation des lits de séchage en boues de vidange :

Tableau VI : Les différentes méthodologies d'alimentation des lits en BV.

Traitements	Définitions	Systèmes concernés	Types
LSP+BV+CH	Ce scénario consistait à mélanger les boues de vidange avec le charbon de bambou broyé avant application au système.	T3, T6 et T9	Plantés
LSP +BV	Ce scénario consistait à alimenter les systèmes concernés avec les boues de vidange uniquement	T1, T4 et T8	Plantés
LSnP+BV+CH	Ce scénario consistait à mélanger les boues de vidange avec le charbon de bambou broyé avant application au système exempt	T7, T11 et T14	Non Plantés

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

	de bambous.		
LSnP+BV	Ce consistait à alimenter les systèmes concernés avec les boues de vidange sans mélange de charbon.	T5, T10 et T13	Non Plantés

Les systèmes T2 et T12 ont été alimenté avec les eaux usées servant ainsi de témoins pour cette étude.

La figure 15 présente le schéma des lits expérimentaux

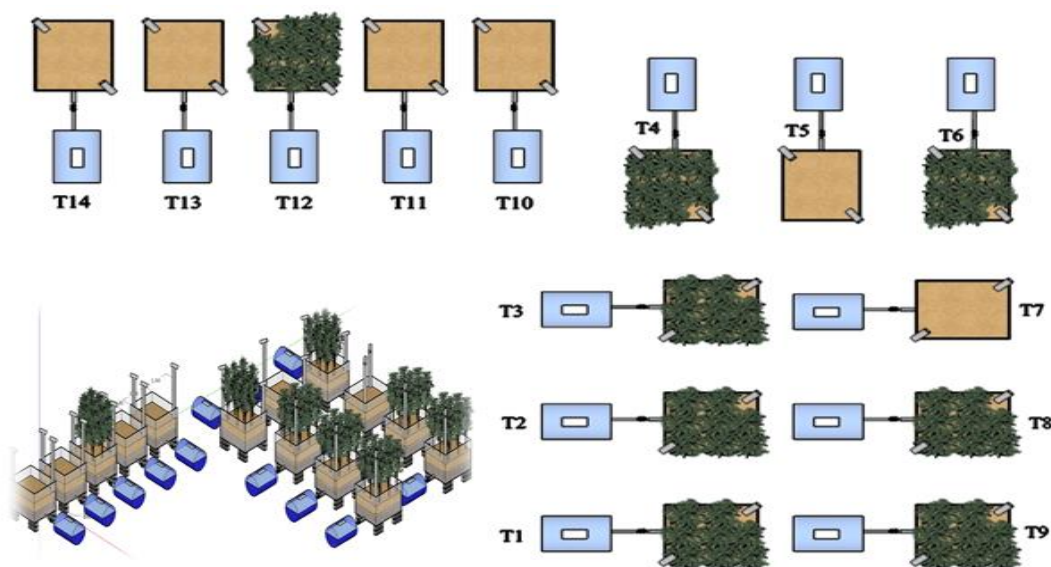


Figure 15: Schéma des lits expérimentaux

III.4.4 Détermination de la charge de boues

Le dispositif expérimental est composé de 6 lits plantés, de 6 lits non-plantés et de 2 lits témoins (T2 et T12). Les lits plantés (T3, T6, T7, T9, T11 et T14) sont alimentée en BV mélangée avec du charbon de bambou préalablement broyé tandis que les lits non plantés (T1, T4, T5, T8, T10 et T13) sont alimentée uniquement en BV. Les charges appliquées aux lits étaient fonction de la concentration en matière sèche (Kg MS/L), de la fréquence d'alimentation par semaine (FA/s), de la hauteur de boues par jour d'alimentation (HBA/j). La charge moyenne appliquée est donnée par la relation suivante :

$$C \text{ (Kg MS. } m^{-2}. an) = MS \text{ (kg/L)} * FA/s * Ns/an * HBA \text{ (mm/j)}$$

$$HBA \text{ (mm/j)} = \frac{V_B}{S_L} * 10^{-3}$$

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Avec V_B : volume de boues par jour d'alimentation (m^3/J)

S_L : la surface du lit en m^2 ($S_L = 1,2 m^2$)

Les résultats de calcul (Tableau VII) nous donnent une charge moyenne de 233,3 KgMS/ m^2 .an pour les lits alimentés en BV mélangée avec du charbon de bambou préalablement broyé et une charge de 155,6 KgMS/ m^2 .an pour les lits alimentés uniquement en BV.

Tableau VII : Détermination des charges appliquées

BV uniquement					
	MS (Kg/L)	FA/s	NS /an	HBA (mm/j)	Charges (Kg MS/m^2/an)
Aout à Septembre	0,0212	2	52	56,47	124,45
Mai à Juillet	0,0212	3	52	56,47	186,67
Moyenne	0,0212	2,5	52	56,47	155,6
BV+CH (50%)					
Aout à Septembre	0,0318	2	52	56,47	186,63
Mai à Juillet	0,0318	3	52	56,47	279,95
Moyenne	0,0318	2,5	52	56,47	233,3

III.5 Elaboration de la cartographique

La carte a été générée directement à partir des différentes coordonnées GPS en utilisant les logiciels dans le domaine des SIG. Il s'agit des logiciels ArcGIS, Quantum GIS, etc.

III.6 Production du charbon de bambou

La méthode de production du charbon (figure 16) utilisée est la pyrolyse lente (apport faible d'oxygène). La gamme de température autorisée pour avoir un bon charbon à la fin de la pyrolyse est compris entre 400°C et 600°C. Cette production de charbon s'est faite en plusieurs étapes :

- Introduire la biomasse dans le système de pyrolyse lente (environ 40 kg de biomasse) ;
- Mettre le feu à la biomasse à l'intérieure du système à l'aide de l'éthanol ;
- Fermer le système et contrôler l'entrée d'aire pendant 6H afin de rester dans la gamme des températures autorisée ;
- Fermer complètement le système sans aucun apport d'oxygène dans le système pendant 3H jusqu'au retour à la température ambiante ;

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

- Enfin ouvrir le système et vider son contenu du charbon biologique.



Figure 16 : Production du charbon par pyrolyse lente à 500°C

III.7 Caractérisation du charbon

L'humidité, la matière volatile, le taux de cendre et le carbone fixe du charbon de bambou sont les paramètres qui ont été recherchés. La mesure du pH et la conductivité a précédé le calcul des paramètres recherchés. Les relations données dans le tableau VIII ci-dessous ont permis de calculer les différents paramètres.

Tableau VIII : Méthode de Caractérisation du charbon (Annexe 3 pour plus de détails)

Paramètres	Méthodes	Formules de calcul	Normes/Références
Humidité (W)	Chauffer un échantillon de biocombustible solide préalablement broyé et tamisé à une température de 105 °C ± 2 °C pendant 2H.	$W = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)}$	NF V03-921
Matière volatiles (Vs)	Chauffer le four à 900 °C, Puis à introduire un échantillon de biocombustible solide préalablement broyé et tamisé pendant 7 min.	$V_s = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)}$	NF V03-921
	consiste à incinérer un échantillon de		

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Taux de cendre (Ts)	biocombustible solide préalablement broyé et tamisé à une température de 815 °C ± 10 °C pendant 4H.	$T_s = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)}$	NF V10-101
Carbone fixe (CF)	Deduire des MVS, Ts et W	$CF = 100 - (Ts + W + MVS)$	NF V10-101

III.8 Caractérisation physico-chimique des boues de vidange brute

In situ, les mesures du pH, la conductivité, et du potentiel redox (Eh) ont été effectuées avec un multi-paramètre HI-9828. Au laboratoire, la pollution de BV a été évaluée par la mesure des paramètres globaux de pollution. Ainsi, la matière contenue dans les boues a été évaluée à travers la mesure des matières en suspension (MES), des matières sèches (MS), et des matières volatiles en suspension (MVS). La pollution azotée par la mesure des nitrates (N-NO₃⁻), les nitrites (N-NO₂⁻) et l'ammonium (N-NH₄⁺). Le suivi de la pollution phosphorée a consisté à la mesure des ortho-phosphates (P-PO₄³⁻) et du phosphore total (PT). Le dénombrement des coliformes fécaux (CF), des streptocoques fécaux (SF) et des parasites ont permis d'évaluer les micro-organismes présents dans les BV. Le tableau IX précise les différentes méthodes d'analyse utilisées.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Tableau IX: Méthodes de caractérisation des BV (Annexe 2 pour plus de détails)

Paramètres	Méthodes	Appareils de mesure/lecture
pH	Mesure directe au multiparamètre HI-9828	Multiparamètre HI-9828
Conductivité	Mesure directe au multiparamètre HI-9828	Multiparamètre HI-9828
Eh	Mesure directe au multiparamètre HI-9828	Multiparamètre HI-9828
MS	Séchage à 105°C jusqu'à masse constante	Etuve
MES	Filtration sur membrane GF/C 0,45 micros puis séchage à 105°C jusqu'à masse constance	Etuve
MVS	Calcination à 550°C pendant 2H	Four
DCO	Méthode colorimétrique, APHA (1998)	DR890
DBO ₅	Respirométrie	NF T 90-103
N-NO ₃ ⁻	Méthode de réduction au cadmium, APHA (1998)	DR3900
N-NO ₂ ⁻	Méthode de diazotisation, APHA (1998)	DR3900
N-NH ₄ ⁺	Méthode Nessler, APHA (1998)	DR3900
P-PO ₄ ³⁻	Méthode à l'acide ascorbique, APHA (1998)	DR3900
PT	Méthode au molybdovanadate, APHA (1998)	DR3900
SF	Ensemencement à 37°C avec du Slanetz et Barhley puis décompte	Etuve
CF	Ensemencement à 44.5°C avec du Chromocult Agar puis décompte	Etuve
Parasites	Méthode de Bailenger modifiée, OMS (1997)	Microscope trinoculaire à épifluorescence

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

III.9 Caractéristiques physique des boues de vidange brute

La masse volumique, la masse volumique des solides, la siccité, la teneur en eau et l'humidité volumique des BV brute sont les paramètres qui ont été recherchés. La mesure des matières solides (MS) a précédé le calcul des paramètres recherchés. Les analyses des MS ont été faites au laboratoire par séchage à l'étuve à 105°C pendant 24H. Les relations données dans le tableau X ci-dessous ont permis de calculer les différents paramètres.

Tableau X: Relation de calcul des paramètres physiques de BV brute

Paramètres	Formules de calcul
Volume de l'échantillon de BV (50 mL)	V_{BV} (mesuré)
Masse du creuset vide	$P_{cr-vide}$ (mesuré)
Masse du creuset avec l'échantillon brut	$P_{cr+éch}$ (mesuré)
Masse du creuset avec l'échantillon sec	$P_{cr+échsec}$ (mesuré)
Matière solide (MS)	$(P_{cr+échsec} - P_{cr-vide}) / V_{BV}$
Masse volumique	$(P_{cr+éch} - P_{cr-vide}) / V_{BV}$
Siccité (s)	$(P_{cr+échsec} - P_{cr-vide}) / (P_{cr+éch} - P_{cr-vide})$
Fraction massique d'eau	$(P_{cr+éch} - P_{cr+échsec}) / (P_{cr+éch} - P_{cr-vide})$
Masse de l'eau (M_e)	$P_{cr+éch} - P_{cr+échsec}$
Volume de l'eau (V_e)	$(P_{cr+éch} - P_{cr+échsec}) \cdot \rho_e$
Humidité volumique	V_e / V_{BV}
Volume solide (V_s)	V_{BV} / V_e
Masse solide (M_s)	$P_{cr+échsec} - P_{cr-vide}$
Masse volumique solide	M_s / V_s
Teneur en eau	M_e / M_s

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Cartographie de la provenance des boues de vidange

La figure 17 ci-dessous nous montrent la cartographie de la provenance des BV brutes fournis par les vidangeurs pour les essais pilotes. Le BV utilisées pour l'alimentation des lits pilotes proviennent des secteurs 10, 3, 4, 23, 42 et 43 respectivement pour BV1, 2, 3, 4, 5 et 6. Les fosses vidangées dans le secteurs 10, 23, 42, étaient de type latrine avec salinité moyenne de 4,2 plus élevée que la moyenne tolérée par une plante et une Siccité moyenne de 8% contre une teneur en eau d'environ 92%. Tant dis que les boues de vidanges provenant des secteurs 3, 4, et 43 étaient de type fosse septique avec une salinité de 0,95, une Siccité moyenne d'environ 2% et une teneur en eau d'environ 98%.

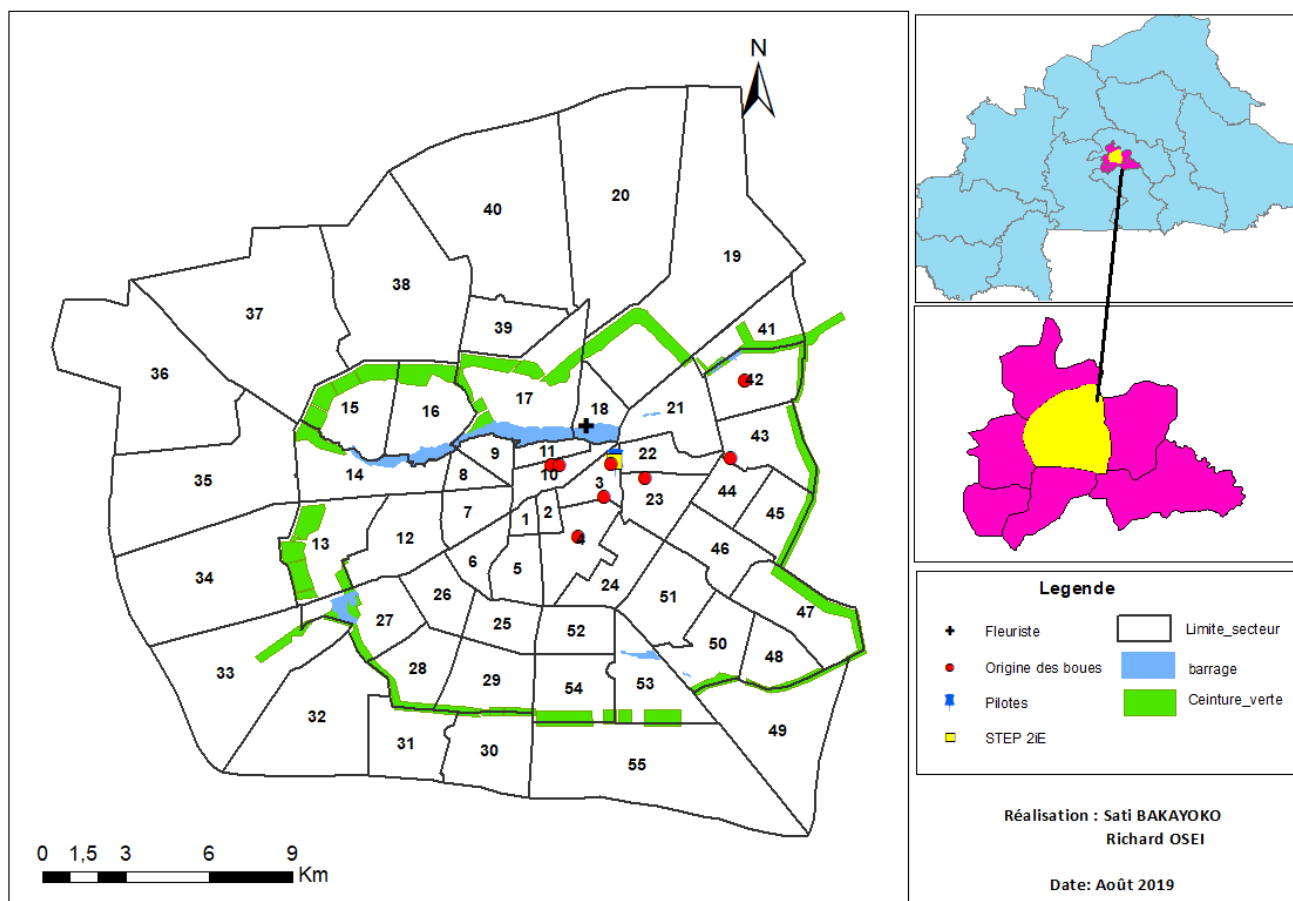


Figure 17: Cartographie de la provenance des BV

IV.2 Production et caractérisation du charbon

IV.2.1 Rendement du produit de la pyrolyse

La figure 18 présente le rendement du charbon en fonction de la température. Des études antérieures ont montré que la température de pyrolyse joue un rôle important sur les rendements de produits carbonisés.

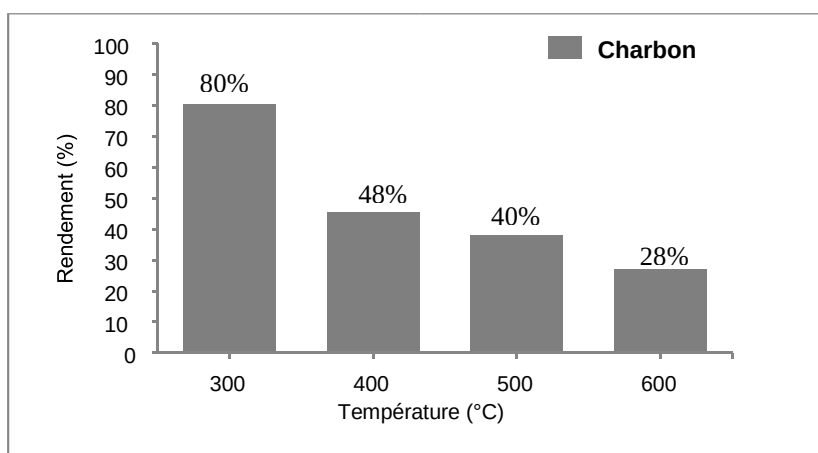


Figure 18 : Rendement de la production de charbon en fonction de la température

Le rendement en carbonate diminue lorsque la température augmente en raison de l'augmentation du taux de dégradation thermique. Un rendement maximal du charbon de 80% a été atteint à 300°C. Le rendement en charbon a diminué jusqu'à 600°C, restant pratiquement constante après cela. Les réactions secondaires des composés volatils sont également favorisées avec l'augmentation de la température entraînant un rendement élevé en gaz.

Une température de 300°C entraîne une grande quantité de charbon, mais des propriétés telles que les structures de pores sont suffisamment développées à environ 500°C par la décomposition thermique complète de la cellulose et des hémicelluloses (Lee et al., 2013b).

L'analyse de la figure 19 ci-dessous montre l'évolution de la température dans le réacteur pendant la production de charbon de bambou. La gamme de température autorisée pour cette pyrolyse est comprise entre 400°C et 600°C. Les températures maximales enregistrées pour les trois (M00, M01 et M02) capteurs dans le réacteur sont respectivement de 590, 452 et 475°C par M00, M01 et M02. Après la carbonisation de toute la biomasse à l'intérieur du réacteur, la température baisse jusqu'à atteindre 45°C après quelques heures de repos.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

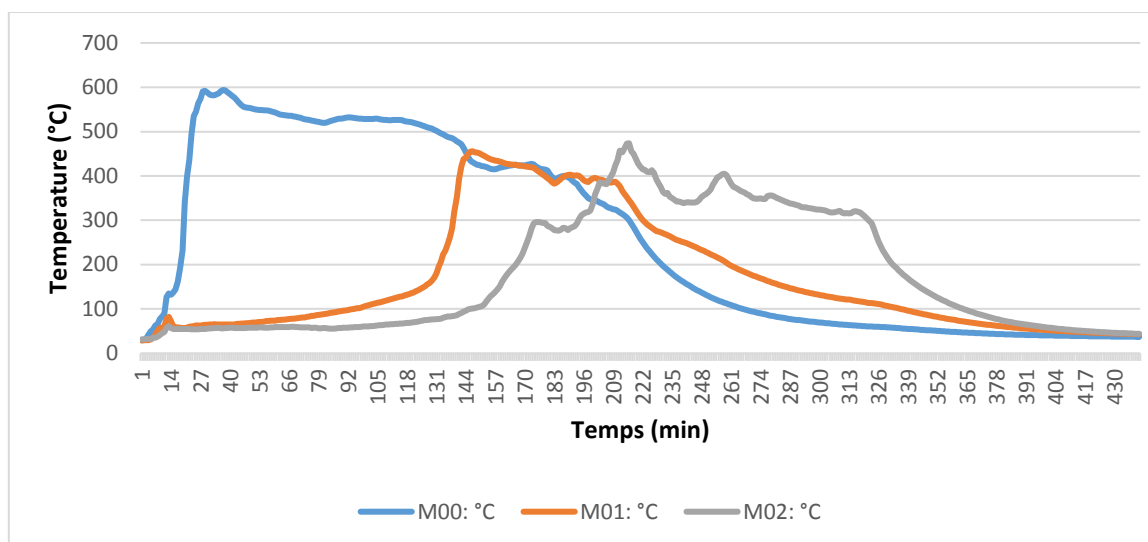


Figure 19: Evolution de la température dans le réacteur

IV.2.2 Caractéristiques du charbon

Le tableau XI ci-dessous nous donne les propriétés du charbon de bambou produit à une température de pyrolyse finale de 500°C, considéré comme la meilleure condition concernant les rendements en produit carbonisé

Tableau XI : Caractéristiques du charbon de bambou produit à 500°C

Paramètres	Données expérimentales				(Hernandez-Mena et al., 2014)	
	Moyenne	Min	Max	δ	Moyenne	δ
pH	8,15	8,08	8,24	0,07	-	-
Humidité (%)	1,9	1,37	2,75	0,59	6,5	1
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	306,33	239	367	52,47	-	-
Taux de cendre (%)	6	5,89	6,09	0,09	3,9	0,4
Matière volatile (%)	2,6	2,4	2,77	0,15	8,1	1,7
Carbone Fixe (%)	91,5	91,34	91,67	0,16	81,5	0,4

Le charbon de bambou présente une densité de particules plus élevée et une densité apparente plus faible que les particules de biomasse. Une compression et une granulation ultérieures du charbon sont indiquées pour la densification de l'énergie. Le charbon produit à 500°C

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

contenait environ 68% de la teneur en énergie de la matière première. La teneur en cendres du charbon était inférieure à celle du charbon de la canne à sucre, qui contient 8,57% selon Lee et al. (2013b). Le résultat final montre que le charbon de bambou est très carboné, avec une teneur en carbone de 91.5%. La teneur élevée en carbone du charbon est avantageuse en termes de maximisation de la quantité de carbone stocké et pourrait être utilisé comme source d'énergie ou pour l'adsorption de polluants par le sol (Lee et al., 2013b).

La figure 20 montre deux images à balayage microscopique électronique du charbon produit à la température finale du réacteur de 500°C.

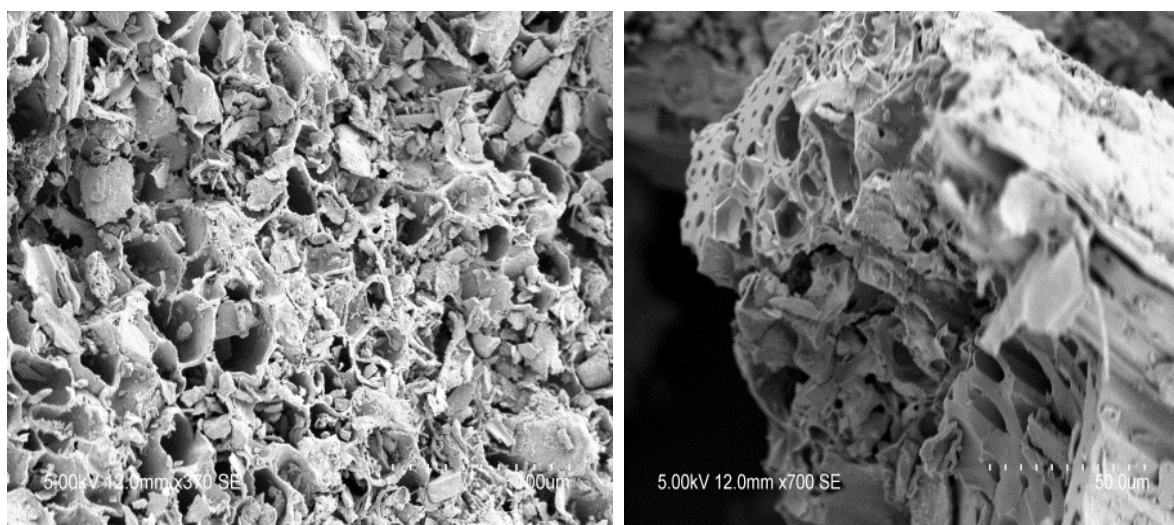


Figure 20 : Images à balayage microscopique électronique du charbon

Le charbon de bambou a développé une grande porosité, présentant des pores longitudinaux avec des tailles allant de micro à macro pores (10-200 μm) et une surface spécifique importante de l'ordre de 500 à 1000 m^2 par gramme de charbon. Les grands pores proviennent des faisceaux vasculaires de la biomasse brute et ils sont importants pour améliorer la qualité du sol car ils peuvent fournir des habitats pour la symbiose micro-organismes (Thiès et Rilling, 2009). Ils peuvent également servir de voies de libération des vapeurs pyrolytiques générés dans le processus (Lee et al., 2013b). Tan et al. (2011) ont rapporté que le charbon de bambou présente une bonne performance comme adsorbant pour l'élimination du mercure élémentaire de la combustion du charbon, ce qui peut être amélioré en utilisant des processus d'activation physique ou chimique.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

IV.3 Caractéristiques des boues de vidange brute

IV.3.1 Caractéristiques physique de BV brute

Les résultats de calcul ont permis de déterminer les valeurs moyennes des différents paramètres recherchés (Tableau XII). La siccité moyenne des BV brutes est de 2,16% et la masse volumique moyenne proche de celle de l'eau ($1006 \pm 4 \text{ kg/m}^3$). La valeur moyenne de la masse volumique des particules solides des BV est proche de celle fumier de poulet (Weill et Duval, 2009). Elle est de 1019 kg/m^3 et varie entre 881 et 1940 kg/m^3 . L'eau représente en moyenne environ 98% du volume des BV. La siccité, la masse volumique des particules solides et la teneur en eau est très variable des boues issues d'un camion de vidange à un autre.

Tableau XII: Caractéristiques physique des BV brutes

Paramètres	Moy	Min	Max	δ
Masse volumique BV (kg/m^3)	1006,33	999,41	1027	3,61
Siccité (%)	2,16	0,06	8,2	2,05
Masse volumique des particules solides (kg/m^3)	1018,7	881	1940	147,56
Humidité volumique (%)	98,37	94,05	100	1,73

IV.3.2 Caractéristiques physico-chimique et microbiologique des boues de vidange

Les boues de vidange utilisées pour l'alimentation du dispositif expérimental proviennent de quelques secteurs (Sect : 3, 4, 10, 23, 42 et 43) de la ville de Ouagadougou. Le tableau XIII ci-dessous résume la qualité des boues de vidange analysées. En comparant les valeurs moyennes avec les normes de rejet au Burkina Faso, il ressort que seuls le pH et les nitrites sont conformes aux normes de rejet. Les caractéristiques des boues à traiter dépendent en grande partie du type de latrine de laquelle elles proviennent ainsi que de leur temps de séjour dans celles-ci. Les boues de vidange sont en général beaucoup plus concentrées que les eaux usées (teneurs en matière organique et en matières en suspension de 10 à 100 fois plus élevées) (Klingel et al, 2002).

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Tableau XIII: Caractéristiques physico-chimique des BV. n : Nombres d'échantillons

Paramètres	n	Moy	Min	Max	δ	Normes
pH	66	7,91	7,28	8,53	0,28	6,5-9
Cond (mS/cm)	66	4,97	1,5	9,9	2,9	1
Eh (mV)	66	-69,36	-105,6	-21,5	20,45	-
MES (g/L)	66	18,86	0,12	85,27	26,91	-
MS (g/L)	66	18,21	0,3	81,95	24,06	-
MVS (%MS)	66	54,6	30,5	89	12,8	-
Salinité	66	2,61	0,72	5,53	1,68	-
Siccité (%)	66	2,16	0,06	8,20	2,05	-
MVS (g/L)	66	6,95	0,06	29,246	9,99	-
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	66	59,92	0,6	1040	182,35	11,4
N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	66	0,29	0,001	2,2	0,56	0,9
N-NH ₃ ⁺ (mg/L)	66	309,28	0,84	735	255,23	35
NTK (g/L)	66	1,99	0,17	4,52	1,13	-
BOD ₅ (mgO ₂ /L)	66	1132,41	100	4900	1068,7	40
DCO (mgO ₂ /L)	66	13324,95	109	645500	62509,95	150
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	66	55,97	0,54	144	28,61	0,8
PT (mg/L)	66	3932,71	11,8	39000	8681,5	-
E-Coli (UFC/g)	66	7,02E+13	10	1,07E+15	1,82+14	-
CF (UFC/g)	66	7,02E+13	50	1,07E+15	1,82E+14	-
SF (UFC/g)	66	6,39E+06	60	5,85E+07	1,53E+07	-
Œufs						
d'helminthes	33	50979	3177	417891	116972	-
(Noeufs/g MS)						

❖ Conductivité, Salinité, potentiel redox et le pH

La conductivité électrique est comprise entre 1,5 mS/cm et 9,9 mS/cm avec une valeur moyenne de d'environ 4,97 mS/cm, indiquent que ses boues sont fortement minéralisées. Ceci permet d'envisager des apports hebdomadaires moyens d'environ 15 à 380 litres de boues sur les lits de séchage expérimentaux de 1,2m² de surface. Au regard de la conductivité moyenne obtenue, les boues de vidange alimentant les lits ne causeraient pas un problème de salinité.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Avec le potentiel redox moyen négatif (-69.36 mV) les boues de vidange analysées ont mis en évidence des conditions hautement anaérobies dues à l'origine des boues. Par ailleurs, l'analyse des résultats du tableau XIII laisse apparaître des boues légèrement basiques avec les valeurs de pH comprises entre 7,28 et 8,53 avec une moyenne de 7,91 (Figure 21). Ces résultats sont relativement similaires aux données de Kouawa et al. (2015) à Ouagadougou qui a rapporté une valeur moyenne de pH de 8 et de Kengne et al. (2008) au Sénégal qui a trouvé un pH moyen de 7,5. La conductivité maximale des boues de vidange de notre étude est faible comparativement à la valeur maximale de salinité valeurs de 15, 05mS/cm rapportée par Kengne et al.(2008). Selon Sobhanian et al. (2011), la salinité est le principal facteur de stress abiotique des plantes en agriculture. En effet, le stress salin élevé perturbe l'homéostasie hydrique des plantes et la balance ionique de celles-ci. Ces changements conduisent à des dommages moléculaires, à l'arrêt de la croissance et même à la mort des plantes.

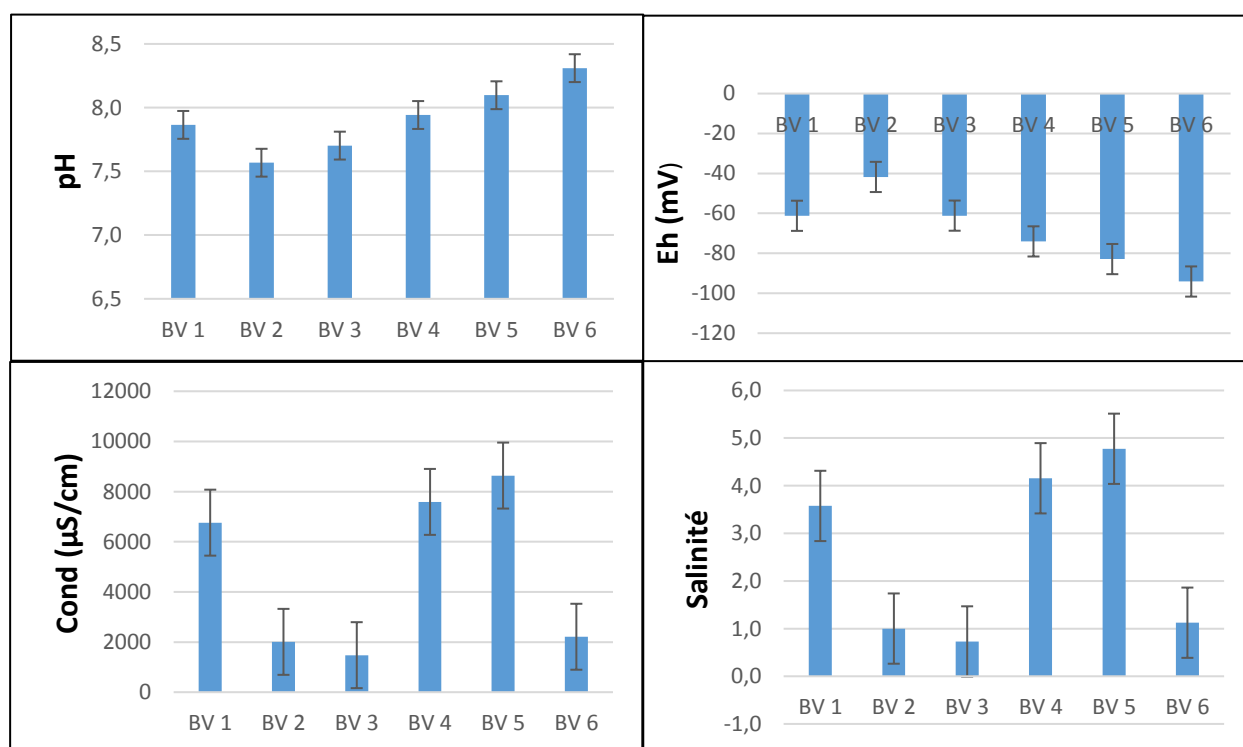


Figure 21 : caractéristiques physiques de boues brutes

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

❖ Matière Sèche, Matière en Suspension et Matière volatile

La concentration moyenne en matière sèche de 18,2g de MS/litre (Figure 22) (soit une siccité de 2,16%) est supérieure aux données par Kouawa et al. (2015). Les MVS représentent en moyenne un pourcentage de 54.6% des MS contre 64,9% trouvé par Kengne(2006). Cette teneur en matières volatiles témoigne que les boues ne sont pas encore assez stabilisées (Gbedo et al., 2015). Avec des apports hebdomadaires moyens de 15 à 380 litres de boues sur les lits de séchage expérimentaux de 1,2m² de surface, la charge d'alimentation appliquée de boues correspond à une alimentation de 155,6 kg de MS/m².an à 233,3 kg de MS/m².an.

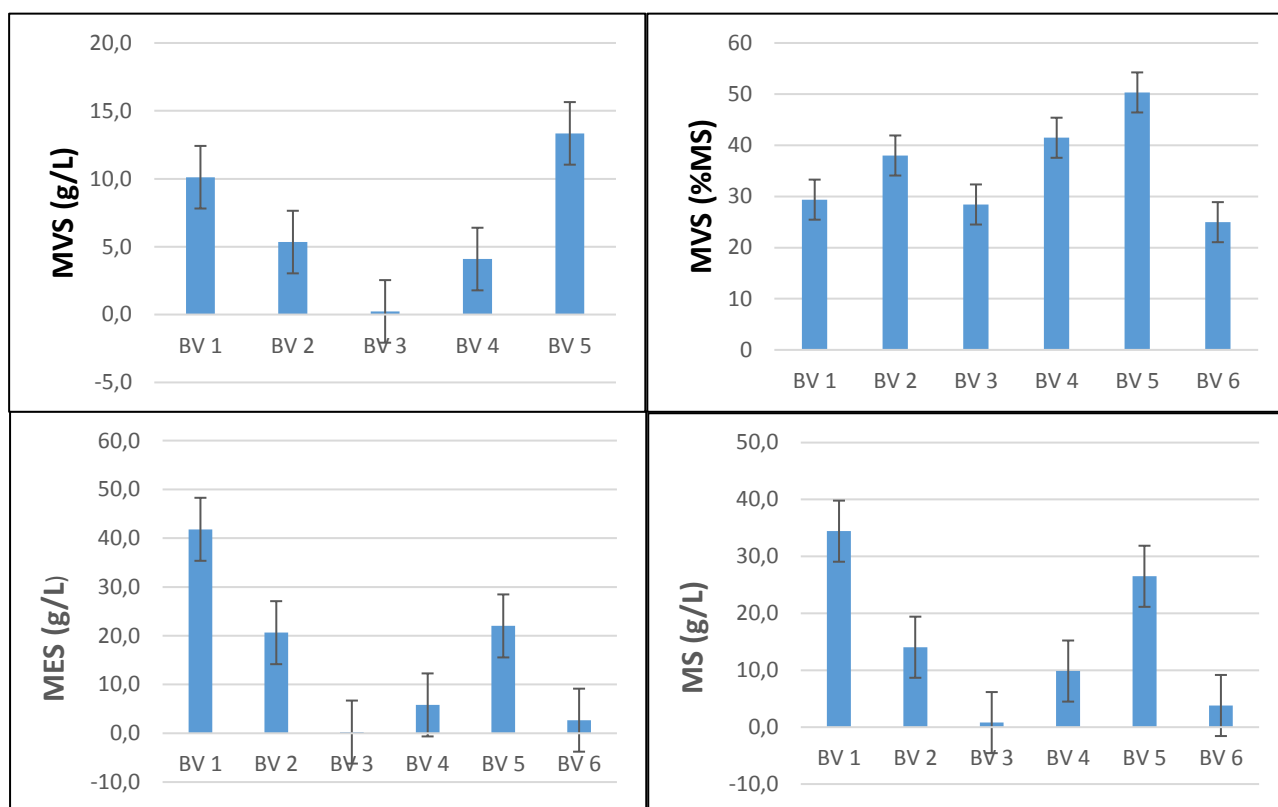


Figure 22: caractéristiques physiques des boues brutes

❖ La DBO₅ et La DCO

Les BV présentent des concentrations moyennes en DCO et en DBO₅ respectivement de 13325 mg/l et de 1132 mg/l valeurs nettement supérieures par rapport aux normes burkinabé (Norme de Rejet au Burkina Faso, 2015) de rejets des eaux usées (Figure 23). La DCO obtenue est relativement supérieures à celles relevées (tableau I) par d'autres auteurs Kouawa et al. (2016), Mahamane (2011), Berteigne (2012), Strauss et Koné (2004) et SIBEAU (2014)

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

respectivement pour les boues de vidange de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso), Ouagadougou (Burkina Faso), de Douala (Cameroun), de la ville de Yaoundé (Cameroun) et de la ville de Cotonou (Bénin). Elle est tout de même inférieure aux résultats d'autres auteurs tels que Koottatep et al. (2005), Koné et Stauss, (2004), Kengne, (2006) et Koffi, (2016) respectivement pour les boues de vidange de la Thaïlande, de la ville d'Accra (Ghana), de la ville Yaoundé (Cameroun), et de la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire). En ce qui concerne la DBO_5 elle reste inférieure aux valeurs obtenues dans les études citées plus haut excepté pour la ville de Yaoundé (Cameroun) où elle est de 731, mg/L. Cette différence pourrait s'expliquer par la dilution des boues (Koné, 2016) car les boues des latrines sont moins diluées que celle des fosses septiques (Defo et al., 2015) et par le fait que les latrines sont plus chargées en polluants que les fosses septiques (Breteigne, 2012). Ses boues contiennent d'importantes matières organiques oxydables, ce qui explique les valeurs élevées de DCO. Par ailleurs, leur fraction biodégradable est relativement faible d'où le rapport $DCO/DBO_5 > 5$ indiquant que ses BV sont difficilement biodégradables (RODIER et al., 2009).

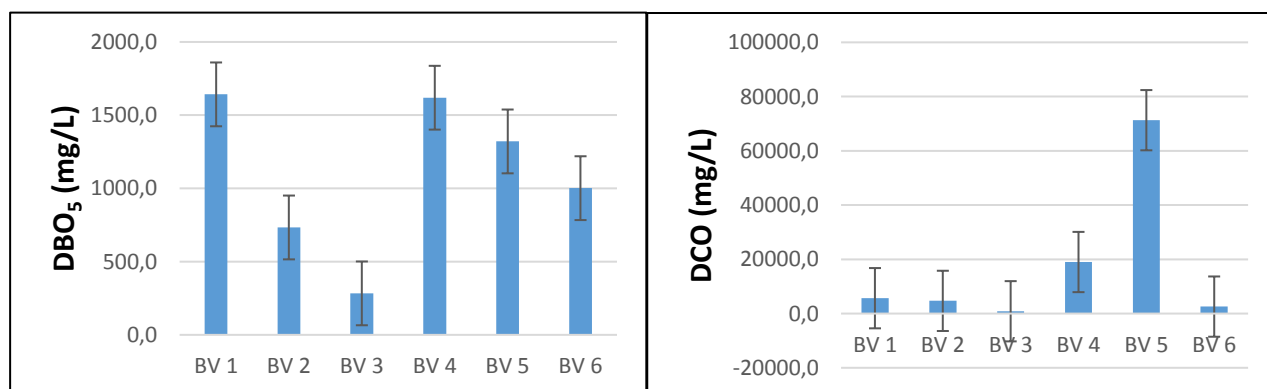


Figure 23 : Caractéristiques chimiques des BV brutes

❖ Le Phosphore

Les boues de vidange contiennent des concentrations importantes en nutriments phosphorés avec une teneur moyenne de phosphore totale de 3932,71 mg/l et une teneur moyenne en ortho-phosphore de 55,97mg/L.

❖ Les composés Azotés

Les boues de vidange contiennent des concentrations importantes en nutriments azotés avec une teneur d'azote total de 167,5 mg/l. L'ammonium représente 55% de l'azote totale (Figure 24), cela s'explique par le fait que l'ammonium est le résultat de la désamination de l'azote

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

organique et de l'urée (Jönsson et al., 2005). On constate que les concentrations en nitrites sont faibles avec une concentration moyenne de 0,29 mg/l et représente que 0.16% de l'azote total. Cette faible teneur s'explique par le fait que l'ion Nitrite (N-NO_2^-) est un composé intermédiaire, instable en présence d'oxygène et dont la concentration est généralement très inférieure à celles des deux formes qui lui sont liées, les ions nitrates et ammonium (Compaoré, 2012). Les autres formes azotées, l'ammonium (N-NH_4^+), les nitrates (N-NO_3^-) et le NTK présentent de fortes teneurs respectivement de 309,3 mg/l, 59,97 mg/l et 107,3 mg/l. Les boues de vidanges sont donc très riches en nutriment pouvant donc être valorisés en agriculture.

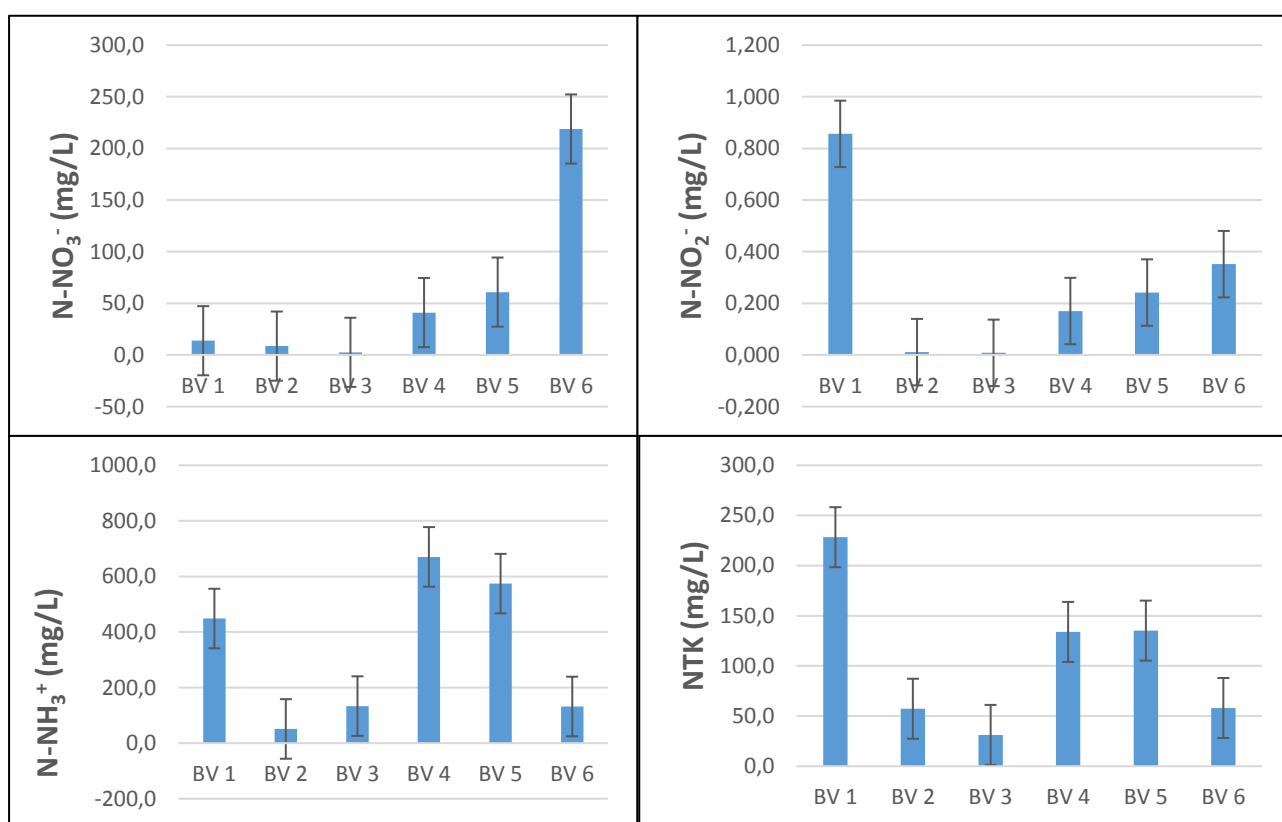


Figure 24 : Caractéristiques chimiques des BV brutes

❖ La qualité microbiologique des BV brute

La qualité microbiologique des BV analysées révèle des concentrations moyennes en indicateurs de contamination fécale de $7,02 \cdot 10^{13}$ UFC/100mL et $6,4 \cdot 10^6$ UFC/100mL respectivement pour les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux (Figure 25). Des concentrations de coliformes fécaux de $7,02 \cdot 10^{13}$ UFC/100mL avec des valeurs minimales et maximales de 50 et $1,07 \cdot 10^{15}$ UFC/100mL respectivement. Les streptocoques fécaux sont les

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

bactéries dont les concentrations sont les plus faibles dans les boues analysées. Une concentration moyenne $6,4.10^6$ UFC/100mL avec des minimales et maximales de 60 et $5,85.10^7$ UFC/100mL respectivement.

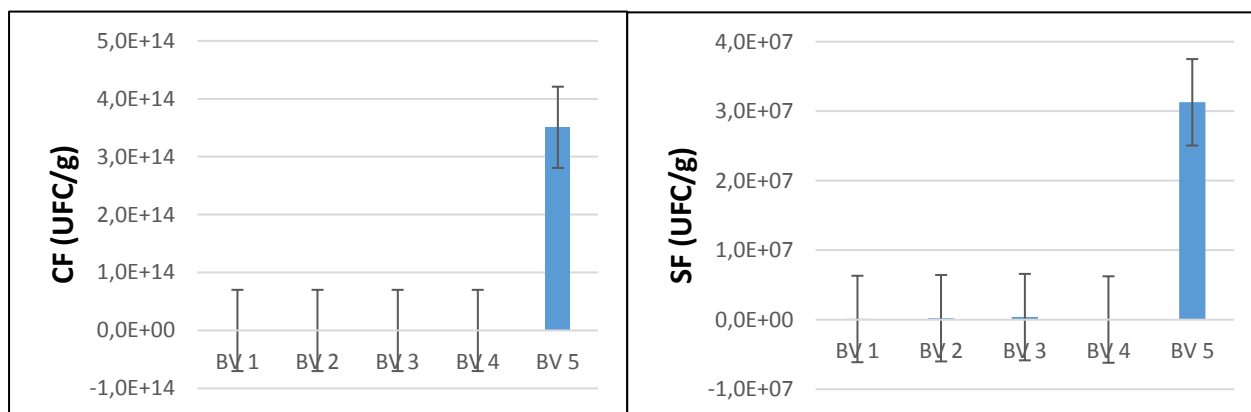


Figure 25 : Caractéristiques microbiologiques des BV brutes

IV.3.3 Effet du charbon de bambou sur la salinité des BV

La figure 26 ci-dessous montre les résultats de l'effet du charbon sur la salinité des BV pour une quantité de 50g de charbon dans 1L de BV brute en fonction du nombre de jours de repos.

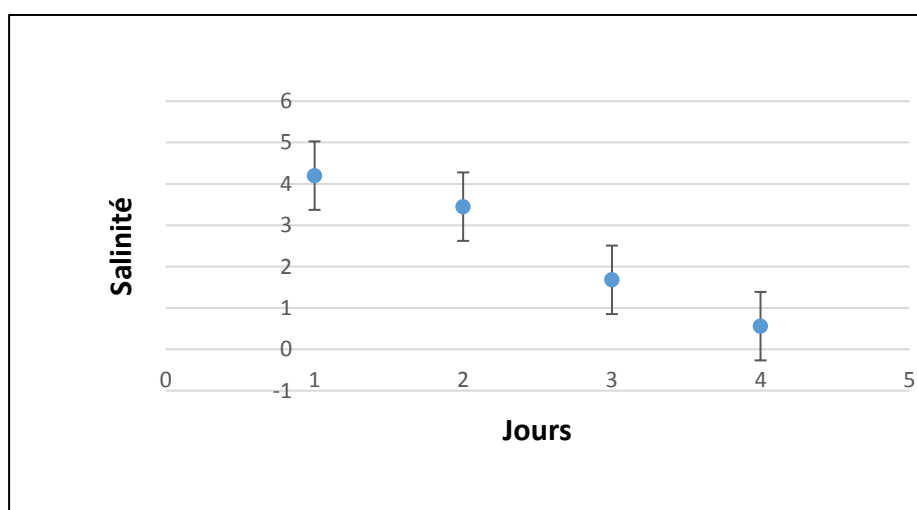


Figure 26 : L'effet du charbon sur la salinité des BV

L'analyse de la Figure 26 nous montrent que le charbon de bambou a un impact considérable sur la réduction de la salinité des boues de vidange. En effet, nous avons introduire une quantité de 50g de charbon de bambou dans un litre (1L) de BV de salinité 4,2 puis laisser reposer le tout pendant 4 jours tout en mesurant la salinité par jour de repos. Les résultats montrent une réduction de la salinité de 4,2 à 0,56 après 4 jours de repos en passant par 3,45 et 1,68 respectivement pour les 2^{ème} et 3^{ème} jours de repos soit une réduction de 87%. Selon

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Pulavarty et Sarangi (2015), après avoir réalisé une expérience sur la tolérance au sel pour trois différentes espèces de bambou, ont mentionné que l'utilisation de cette espèce pour la gestion de la pollution pourrait avoir des avantages environnementaux et écologiques importants en raison de son utilité dans le secteur industriel.

IV.4 Evaluation du biosolide

IV.4.1 La hauteur du biosolide sur les lits

Le Tableau XIV ci-dessous donne les valeurs moyennes de hauteurs des BV sur les lits de séchage. Les hauteurs moyennes de biosolide à la surface des lits est de 15,63, 12,08, 11,32, et 7,89 cm respectivement pour les LSP+BCH+BV, LSP+BV, LSnP+BCH et LSnP après 5 mois d'alimentation des lits expérimentaux. Les hauteurs élevées de biosolide dans les LSP+BCH+BV comparativement aux LSP+BV est dû au charbon de bambou et aux racines des plantes dans le système. En ce qui concerne les non plantés la différence de hauteur peut s'expliquée par l'ajout du charbon de bambou dans les LSnP+BCH.

Tableau XIV: Hauteurs du biosolide sur les lites

Systèmes	Hauteurs Moyennes (cm)
LSP+BCH+BV	15,63
LSP+BV	12,08
LSnP+BCH	11,32
LSnP	7,89

IV.4.2 Caractéristiques physiques moyens du biosolide

Les résultats de calcul ont permis de déterminer les valeurs moyennes des différents paramètres physiques des biosolides (Tableau XV). La siccité moyenne dans les biosolides à la surface des lits après trois mois de repos et de suivis est de 91,64%, 93,79%, 80,93% et 81,67% respectivement pour les LSP+BCH+BV, LSP+BV, LSnP+BCH et LSnP. L'eau représente en moyenne environ 8,36%, 6,21%, 19,07% et 18,33% respectivement pour les LSP+BCH+BV, LSP+BV, LSnP+BCH et LSnP dans le biosolide. Ainsi La teneur en eau dans le biosolide varie entre 6,21% et 19,07% selon les systèmes traduisant un degré de déshydratation varié avec un niveau de déshydratation plus important dans les LSP

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Tableau XV : Caractéristiques physiques moyens du biosolide

Paramètres	n	LSP+BCH+BV	LSP+BV	LSnP+BCH	LSnP
Siccité (%)	36	91,64	93,79	80,93	81,67
Humidité (%)	36	8,36	6,21	19,07	18,33

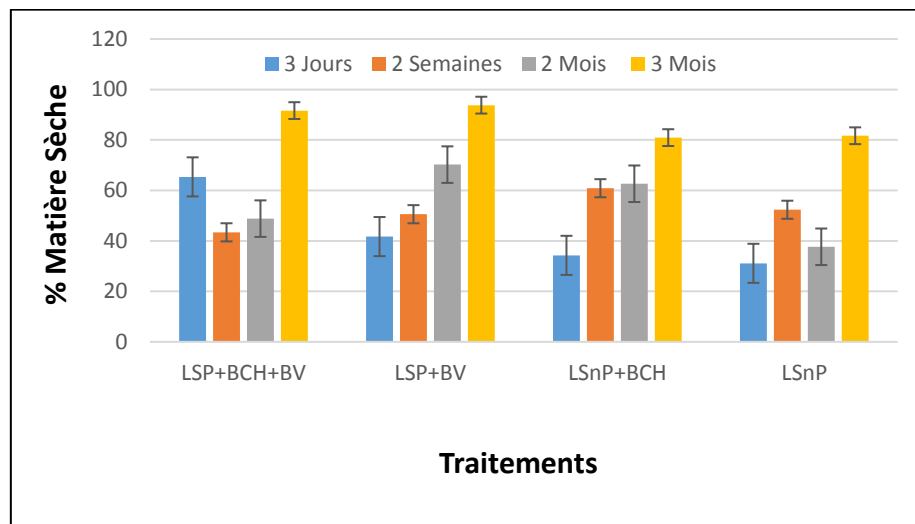


Figure 27: Evaluation de la matière sèche en fonction des traitements

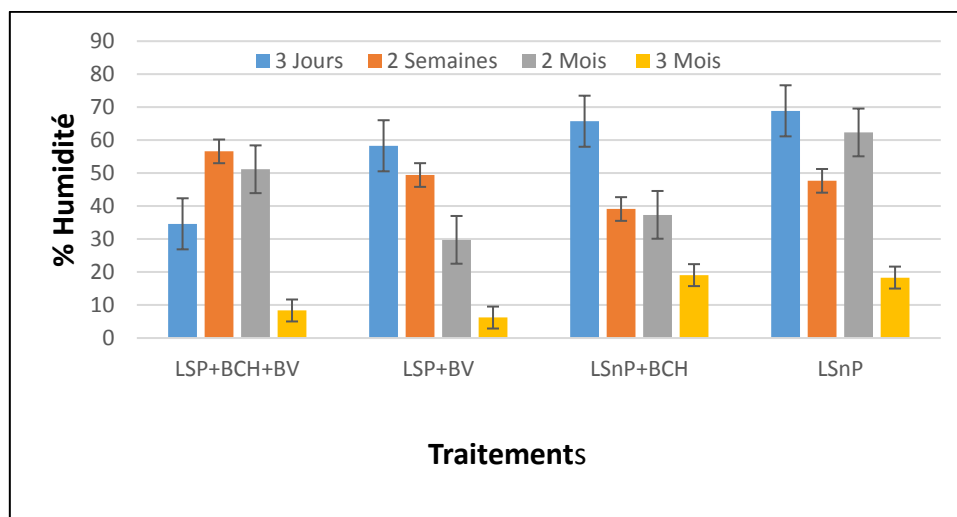


Figure 28 : Evaluation de l'humidité en fonction des traitements

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

IV.4.3 Caractéristiques physico-chimiques du biosolide

Les paramètres couramment utilisés pour caractériser la maturité du compost ont révélé que les biosolides obtenus peuvent être assimilés à du compost mature, bien que le processus de déshydratation n'ait pas été soumis à un traitement mésophile classique, thermophile et maturation. En effet, le rapport C/N des biosolides obtenus était égal à 11,06 une valeur proche de celle généralement trouvée dans les composts mature. Les biosolides sont légèrement acide (pH=6,36) avec un faible niveau de salinité (0,04) et une conductivité faible (75,83µs/cm). Excepté le pH ses valeurs sont inférieures à ceux trouvées par (Kengne, 2006) (pH : 6,01 ; Sal : 0,1 ; Con : 259µs/cm et C/N : 11,3). La qualité des biosolides accumulés sur les lits a été surveillée pendant 3 mois et les résultats (Tableau XVII) montrent un taux d'humification de 13% et un taux de Matière Sèche de 87%. Les biosolides semblent avoir une haute valeur fertilisante (Norg: 2,66% ; PO_4^{3-} : 2,83% ; COT: 23,8% ; PT: 24,31% et NTK: 8.58%). Exception faite du phosphore 3,08%, ces résultats convergent vers ceux trouvés par Kuffour et al., 2013 (%N : 2,98 ; %C : 37,7 ; C/N : 13,9). La concentration en œufs d'helminthes a été réduite de 2514 œufs / g MS à 1597 œufs / g MS après trois mois de suivi soit un abattement en œufs d'helminthes d'environ 36%. L'élimination des coliformes fécaux est supérieure à 3Ulog. La teneur élevée en nutriments est similaires à ceux du fumier de volaille couramment utilisé comme engrais organique, notamment en ce qui concerne l'azote et le phosphore total (tableau XVII). La valeur fertilisante des biosolides obtenus est légèrement supérieure à par rapport aux données rapportées par des études similaires menées au Cameroun (N organique total et P_2O_5 de 2,0 et 2,3%, respectivement).

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Tableau XVI : Caractéristiques physico-chimiques du biosolide (n : 36)

Paramètres	Moyenne	LSP+CH+BV	LSP+BV	LSnP+CH	LSnP	ET
pH	6,36	6,23	6,38	6,35	6,46	0,07
Cond (µs/cm)	75,83	34,56	74,56	88,89	105,33	21,28
Salinité	0,04	0,02	0,04	0,04	0,05	0,01
MVS (%MS)	11,91	20,28	10,93	9,46	6,96	4,19
%MO	48,63	60,92	40,6	53,82	39,17	8,74
%CT	24,31	30,46	20,3	26,91	19,58	4,37
NO₂⁻ (%MS)	0,62	0,71	0,34	0,69	0,72	0,14
N-NO₂⁻ (%MS)	0,19	0,22	0,1	0,21	0,22	0,04
NO₃⁻ (%MS)	332,21	11,66	72,16	847,93	397,1	290
N-NO₃⁻ (%MS)	29,03	28,72	16,34	36,69	34,38	6,5
NH₃⁺ (%MS)	3,35	6,86	2,24	2,3	1,99	1,76
N-NH₃⁺ (%MS)	2,78	5,63	1,91	1,93	1,64	1,42
NH₄⁺ (%MS)	3,57	7,27	2,47	2,42	2,12	1,85
NTK (%MS)	8,58	9,89	6,05	9,74	8,66	1,27
Norg (%MS)	2,66	1,37	1,57	4,07	3,65	1,2
NT (%MS)	34,94	35,53	20,48	43,39	40,37	7,23
PO₄³⁻ (%MS)	2,83	3,67	2,25	2,75	2,66	0,42
PT (%MS)	23,05	41,07	10,52	17,64	22,98	9,01
E-Coli (UFC/g)	109	49	4	25	359	125
CF (UFC/g)	6164	5091	2151	6911	10503	2543
SF (UFC/g)	1008	1677	715	1086	554	374
Œufs d'helminthe (No/g MS)	1597	354	380	2865	2789	1230

L'analyse du graphe ci-dessous (figure 29) montre des biosolides légèrement acide (pH=6,36) conditionnant l'activité microbiologique et un faible niveau de salinité (0,04). Un pH acide est propice au développement des bactéries et des champignons en début de minéralisation alors qu'un pH basique développe les actinomycètes et les bactéries alcalines. L'optimum de pH se situe entre 5,5 et 8 et une extrême variation de la valeur du pH indiquerait des problèmes de décomposition pendant le processus (Guanzon et Holmer 2003). La conductivité électrique témoigne de la qualité nutritive du biosolide (Cond=75,83µS/cm). Une conductivité élevée pourrait être due à la dissolution du chlorure de sodium qui n'est pas bénéfique aux plantes. Ceci est particulièrement important pour l'application du compost dans l'agriculture, car une salinité élevée du sol peut inhiber la germination et la croissance des plantes. Cofie et al. (2009), en citant l'Association des Usines de Compostage Suisses (VKS), soulignent que la

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

valeur maximale de la conductivité dans le compost final devrait être inférieure à 4 mS/cm pour une utilisation en jardinage de paysage par exemple. Les graphes ci-dessous présentent les caractéristiques physico-chimiques des biosolides par traitements appliqués.

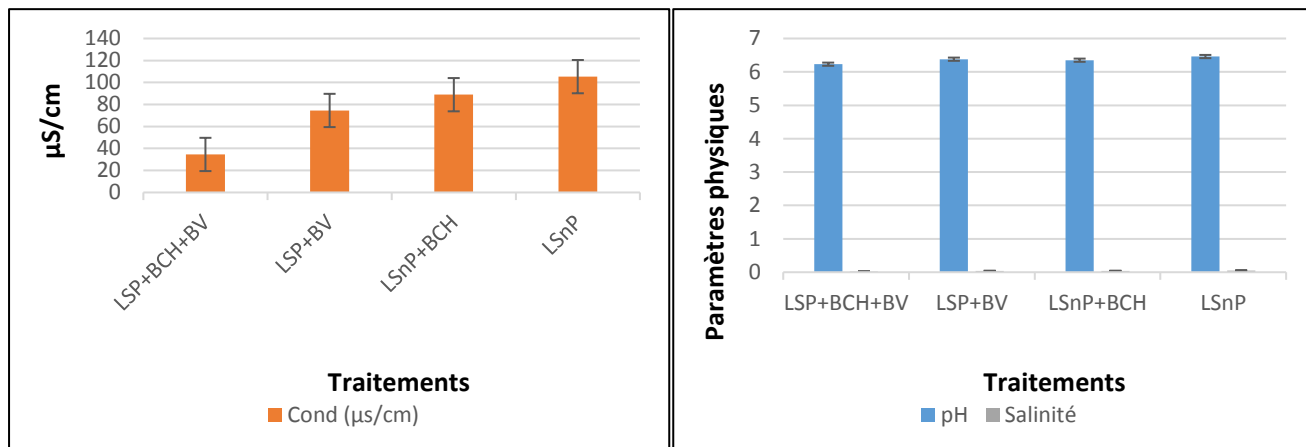


Figure 29 : Evaluation des paramètres physiques par traitements

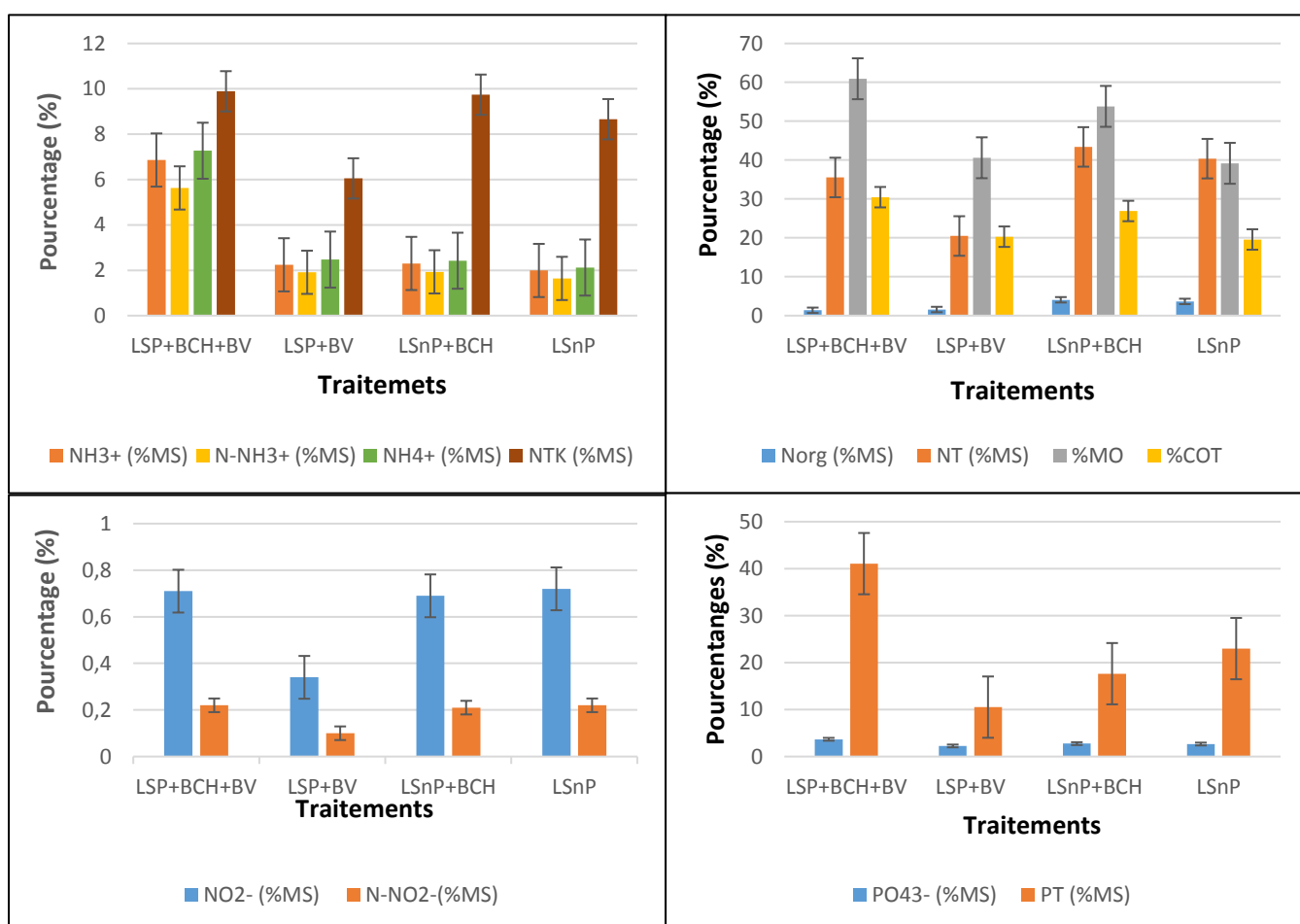


Figure 30 : Caractéristiques physico-chimiques des biosolides

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

L'analyse de la figure 30 montre que le NTK, a une concentration moyenne élevée dans tous les systèmes. Elle est de 9,89%, 6,05%, 9,75% et 8,66% des MS respectivement pour les LSP+BCH+BV, LSP+BV, LSnP+BCH et LSnP. En général il y a donc eu dans les systèmes une production d'azote pendant la phase minéralisation. Les proportions de N-NH_3^+ , NH_3^+ et NH_4^+ sont plus élevées dans les systèmes plantés utilisant du charbon de bambou. Elles sont en moyenne de 6,86%, 5,63% et 7,27% des MS respectivement pour les NH_3^+ , N-NH_3^+ et NH_4^+ . Les concentrations de NT sont restées supérieures aux autres dans les systèmes car NT est la somme de NTK, N-NO_3^- et N-NO_2^- . Les concentrations de Norg restent en dessous de celle du NTK, car le NTK est la somme de N-NH_4^+ et de Norg. La concentration en PT est supérieure à celle de PO_4^{3-} car le PT regroupe tous les composés phosphorés.

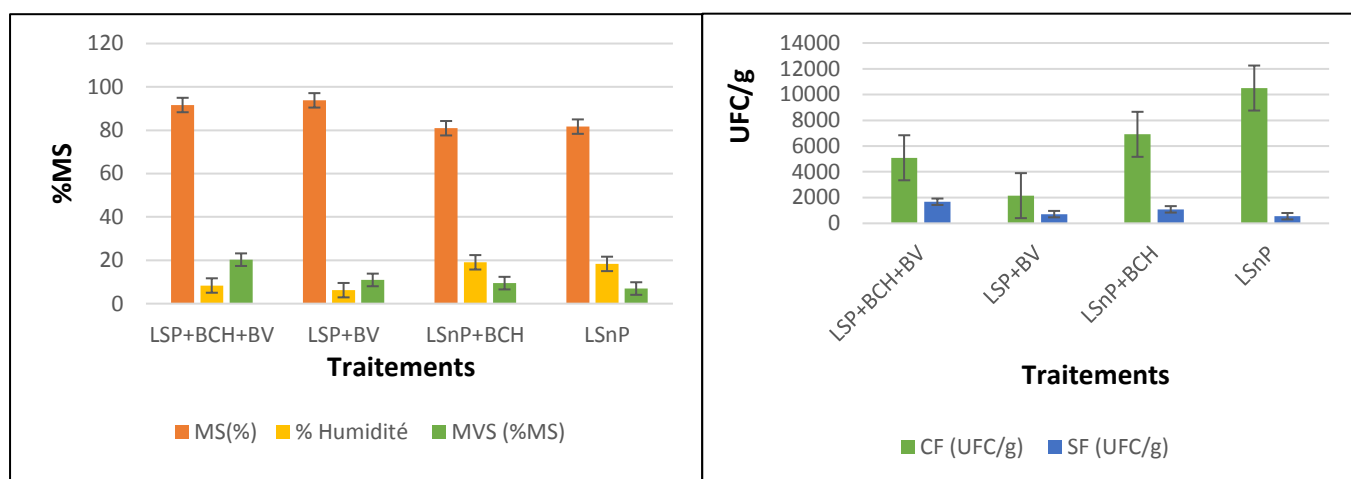


Figure 30 : Caractéristiques physiques et microbiologiques des biosolides

La figure 31 montre les différentes valeurs moyennes des paramètres physiques des biosolides et microbiologiques. La siccité moyenne dans les biosolides à la surface des lits après trois mois de repos et de suivis est de 91,64%, 93,79%, 80,93% et 81,67% respectivement pour les LSP+BCH+BV, LSP+BV, LSnP+BCH et LSnP. L'eau représente en moyenne environ 8,36%, 6,21%, 19,07% et 18,33% respectivement pour les LSP+BCH+BV, LSP+BV, LSnP+BCH et LSnP dans le biosolide. La teneur en eau dans le biosolide varie entre 6,21% et 19,07% selon les systèmes. Les MVS représente en moyenne environ 20,3%, 10,9%, 9,5% et 6,96% de MS respectivement pour les LSP+BCH+BV, LSP+BV, LSnP+BCH et LSnP dans le biosolide.

La concentration en CF (6164 UFC/g de MS en moyenne) reste importante après trois mois de repos. Même si le taux abattement en CF reste supérieur à 3 Ulog, la concentration

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

résiduelle en CF reste élevée. Les SF (1008 UFC/g de MS en moyenne) par contre ont une concentration nettement inférieure à celle des CF.

IV.4.4 Qualité hygiénique du biosolide

Les échantillons de Biosolides après trois mois de suivi et d'évaluation ont révélé une concentration élevée des œufs d'helminthes. À l'échelle mondiale, presque tous les œufs d'helminthes appartiennent à la classe de nématodes (Ascaris, Fasciola Hepatica, Hookworm, Metagonimus yokogawai, S. Japonica, Strongeloides) (tableau XVIII). Ascaris était l'espèce d'helminthes la plus répandue trouvée (54,8% du total), suivi d'Ascaris lumbricoides (34,4%), Fasciola Hepatica (2,2%), Hookworm (1,8%), Metagonimus yokogawai (2,4%). S. Japonica représente 1,6% du total, Strongeloides (2,8%). La concentration d'œufs d'Ascaris dans les biosolides est restée élevée comme dans les boues brutes. Cette espèce de nématodes a une prévalence extrêmement élevée dans pays en développement. En moyenne, environ 1597 œufs d'helminthes (dénombrement total) ont été obtenus par g de MS dans les lits de séchage. Ce nombre est relativement plus élevé que les 79 œufs / g MS signalés dans des biosolides déshydratés au Cameroun Kengne(2006). Par conséquent, les biosolides retirés des lits au bout de trois mois, ne peut être utilisé ou recommandé à des fins agricoles car la probabilité d'avoir des contaminations infectieuse pourrait être plus élevée

Tableau XVII : Nombre œufs d'helminthe dans les boues déshydratées après trois mois

	N œufs/g MS	Proportions (%)
Ascaris	875	54,8
Ascaris lumbricoides	550	34,4
Fasciola Hepatica	35	2,2
Hookworm	29	1,8
Metagonimus yokogawai	38	2,4
S. Japonica	25	1,6
Strongeloides	45	2,8
Total moyen	1597	100

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

IV.5 Abatement des quelques paramètres physico-chimiques et microbiologiques

Le tableau XIX présente l'abattement de quelques paramètres physico-chimiques, microbiologiques dans les biosolides.

Tableau XVIII : Abattements des paramètres physico-chimiques et microbiologiques

Paramètres	Unités	BV brutes	Biosolides	η (%)	Ulog
Cond	mS/cm	4,97	0,076	98,47	-
Salinité	-	2,61	0,04	98,47	-
MVS	%MS	54,6	11,91	78,19	-
N-NO₂⁻	g/l	0,29	0,19	34,48	-
CF	UFC/g	7,02E+13	6164	99,99	10,05
SF	UFC/g	6,39E+06	1008	99,98	3,8
Œufs d'helminthe	No/g MS	50987	1597	96,87	1,09

L'analyse des résultats du tableau XIX laisse apparaître de meilleurs abattements des CF (99,99%) soit 10,05 Ulog et SF (99,98%) soit 3,8 Ulog dans les biosolides pour un temps de repos de trois. Les MVS qui ont des taux abattement respectif de 34,48% et 78,19%. Tous les autres éléments du tableau ont des abattements supérieurs à 90%. Le traitement par LSP a donc permis d'avoir de meilleurs abattements de certains paramètres physico-chimiques et microbiologiques.

V. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

V.1 CONCLUSION

Dans cette étude, une pyrolyse lente du bambou a été réalisée et le produit du rendement (40%) en fonction de la température finale du réacteur ont été déterminés. Outre le rendement, les propriétés physiques du charbon de bambou produit à 500°C ont été déterminées afin de vérifier les principales caractéristiques et applications de ce produit. La caractérisation du charbon montrait une teneur élevée en carbone (91%), une teneur en eau (1,9%), une teneur en cendre (6%), une teneur en matière volatile (2,6%). Les propriétés du charbon obtenues ont permis le conditionnement des boues de vidange dans les lits de séchage. Par ailleurs les boues de vidange utilisées pour l'alimentation du dispositif expérimental proviennent de quelques secteurs (Sect : 3, 4, 10, 23, 42 et 43) de la ville de Ouagadougou. Les caractéristiques des BV varient fortement d'une boue à une autre. Les paramètres des pollutions physiques, chimiques et microbiologiques (Coliformes fécaux, Streptocoques fécaux et les œufs d'helminthes) ont été suivis dans les boues alimentant 12 lits expérimentaux et dans les biosolides. Les résultats montrent des concentrations élevées en DCO (13,32 g/L), de DBO (1,13 g/L), en PT (3,93 g/L), en $N-NH_3^+$ (309,3 mg/L) et en $N-NO_3^-$ (59,92 mg/L). La qualité des biosolides accumulés sur les lits a été surveillée pendant 3 mois. Les résultats montrent un rapport C/N (11,06), un taux d'humification (13%) et un taux de Matière Sèche (87%). Les biosolides obtenus après les trois de suivi ont une haute valeur fertilisante. Les pourcentages paramètres chimiques obtenus en Norg, PO_4^{3-} , CT, PT, et NTK sont respectivement de 2,15%, 2,83%, 23,8%, 23,5% et de 8,58%. La conductivité et la salinité moyenne était respectivement de 75,83 μ S/cm et de 0,04. La concentration moyenne en œufs d'helminthes a été réduite de 50979 œufs / g MS dans les BV brutes à 1597 œufs / g MS dans les biosolides après trois mois de suivi soit un abattement d'environ 98,6%. En ce qui concerne les coliformes fécaux et les Streptocoques Fécaux l'abattement est respectivement de 10,05 Ulog et 3,8 Ulog. Le conditionnement de BV a contribué à l'amélioration des paramètres physico-chimiques des biosolides. Malgré des abattements élevés, les biosolides conditionnés ne sont toujours pas hygiénisés. Enfin, nous pouvons dire que dans les conditions expérimentales de l'étude, les résultats montrent que le *Bambousa Vulgaris* peut être utilisé dans les lits de séchage plantés comme macrophyte pour le traitement des BV dans le contexte climatique soudano-sahélien de la ville de Ouagadougou.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

V.2 RECOMMANDATIONS

Pour la mise en œuvre effective de ce système de traitement des BV nous recommandons :

- ❖ De passer des dispositifs expérimentaux à la réalisation concrète de ce système de traitement (LSP) à l'échelle d'une ville ;
- ❖ De respecter la charge idéale de boues brutes à appliquer pour limiter les risques de colmatage précoce des LSP ;
- ❖ Le suivi rigoureux et le contrôle des LSP afin d'éviter les risques de colmatage et le stress hydrique des macrophytes ;
- ❖ De valoriser des boues de vidange déshydratées issues des LSP par co-compostage ;
- ❖ De Valoriser des bambous après utilisation pour le traitement des BV (Annexe1);

Comme perspectives nous proposons de compléter cette étude par

- ❖ Suivi les métaux lourds et les micropolluants organiques dans les boues brutes, dans les biosolides et dans les macrophytes utilisés pour le traitement des boues de vidange pour évaluer le niveau de transfert des polluants

VI. BIBLIOGRAPHIE

- Akpaki, O., Baba, G., Koledzi, K.E., and Segbeaya, K. (2016). Quantification and valorization in biogas the fecal sludge from the site of Attidjin in Lome. 30.
- Bamboo Information Network (2011) Growing Bamboo for Money Healthy Environment.
- BCG (2013). Sanitation data.
- Berteigne, B. (2012). Projet MAFADY: Quantification et caractérisation des boues de vidange issues des villes de Douala et Yaoundé (Cameroun) et proposition de traitement.
- Bigumandondera, P. (2014). Étude de l'assainissement non collectif en Afrique Subsaharienne : Application à la ville de Bujumbura. 276 p.
- Brix H (2003) Plant Used in Constructed Wetland and their Functions. 1St International seminar on the Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetland, Lisboa.
- Bromblet, H., & Somaroo, G. (2015). LES TECHNIQUES DE COMPOSTAGE DE DÉCHETS D'ORIGINE NATURELLE EN AFRIQUE ET DANS LES CARAÏBES. *Plateforme Re-Sources*, 12.
- Charnay, F. (2005). *Compostage des déchets urbains dans les Pays en Développement : élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost*. (Thèse). Université de Limoges Faculté des Sciences et Techniques; Chimie et Microbiologie de l'Eau, Limoges.
- Compaoré, F. (2012). Gestion des eaux usées et excreta dans un milieu carcéral en Afrique de l'ouest: cas de la maison d'arrêt et de correction de Ouagadougou (MACO) au Burkina Faso.
- Coulibaly, S.L., Sangaré, D., Akpo, S.K., Coulibaly, S., Bamba, H.B., and Coulibaly, L. (2016). Assessment of Wastewater Management and Health Impacts in African Secondary Cities: Case of Dimbokro (Côte D'Ivoire). *J. Geosci. Environ. Prot.* 4, 15.
- Defo, Fonkou, C., Mabou, T., Nana, P., Manjeli, P., and Yacouba (2015). Collecte et évacuation des boues de vidange dans la ville de Bafoussam, Cameroun (Afrique centrale). Univ. Qué. À Montr. VertigO.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

- Douma, N. T. (2013). *Valorisation par compostage des résidus solides urbains de la commune de Chlef, Algérie* (Thèse Unique). Université de Limoges, France.
- He, R., Salvato, F., Park, J.J., Kim, M.J., Nelson, W., Balbuena T. S., Willer, M., Crow, J.A., May G.D., Soderlund, C.A., Thelen, J.J., Gang, D.R., 2014. A systems-wide. Comparaison of red rice (*Oryza longistaminata*) tissues identifies rhizome specific genes and proteins that are targets for cultivated rice improvement. *BMC Plant Biology* 12, 14-46. doi: 10.1186/1471-2229-14-46.
- Hernandez-Mena. Laidy E., Arai A. B. Pécora, Antonio L. Beraldo., 2014, Slow Pyrolysis of Bamboo Biomass: Analysis of Biochar Properties, 115-120.
- Hounkpe, S.P., Adjovi, E.C., and Crapper, M. (2014). Wastewater Management in Third World Cities: Case Study of Cotonou, Benin. *J. Environ. Prot.* 13p.
http://www.pcaarrd.dost.gov.ph/home/momentum/bamboo/index.php?option=com_content&id=1312:growing-bamboo-for-money-and-healthyenvironment&catid=118&Itemid=5.
- JMP (2017). Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène : mise à jour 2017 et évaluation des Objectifs de Développement Durable.
- Jönsson H., Baký A., Jeppsson U., Hellström D., Kärrman E. (2005). Composition of Urine, Faeces, Greywater and Biowaste for Utilization in the URWARE Model. Urban water Report of the MISTRA Programme, Report 2005:6, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden
- Kengne, I.M., Akoa, A., Soh Kengne, E., Bemmo, N., P.-H., Koné, D., 2011. Vertical-flow constructed wetlands as an emerging solution for fecal sludge dewatering in developing countries. *J. Water Saint. Hyg. Dev.* 01 (1). 13-19.
- Kengne, I.M., Akoa, A., Soh, E.K., Tsama, V., Ngoutane, N.M., Dodane, P.H., Koné, D., 2008. Effects of fecal sludge application on growth characteristics and chemical composition of *Echinochloa pyramidatis* (Lam.) Hitch. And Chase and *Cyperus papyrus* L. *Ecol. Eng.* 34, 233-242.
- Kengne, I.M., Dodane, P.-H., Akoa, A., Koné, D., 2009. Vertical flow constructed wetlands as sustainable sanitation approach for fecal sludge dewatering in developing countries. *Desalination* 251, 291-297.
- Klingel, F., Montangero, A., Koné, D., and Strauss, M. (2002). Gestion des boues de vidange dans les pays en développement. (Ghana: EAWAG/Sandec).

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

- Koanda, H. (2006). Vers un assainissement urbain durable en Afrique subsaharienne: Approche innovante de planification de la gestion des boues de vidange. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE.
- Koffi, S. (2016). Etude d'avant-projet détaillé d'une station de traitement des boues de vidange du district d'Abidjan.
- Kone, D. and M. Strauss (2004). Performances et Challenges des Techniques de traitement à faible coût (rustiques) des Boues de Vidange. Forum de recherche en eau et assainissement, CREPA. Ouagadougou, Burkina Faso.
- Kone, M., Service, E., Ouattara, Y., Ouattara, P., Bonou, L., and Joly, P. (2016). Caractérisation des boues de vidange dépotées sur les lits de séchage de zagtoui (Ouagadougou).
- Kouawa T., Wanko A, Beck C, Mose R, Maiga AH (2015) Feasibiliy Study of Feecal Sludge Treatment by Constructed Wetlands in Sahelian Context: Experiments with *Aryza Longistaminata* and *Sporobolus Pyramidalis* Species in Ouagadougou. *Ecol Eng* 84: 390-97.
- Kuffour A.R., E. Awuah, N. Adamtey, F.O.K. Anyemedu and D. Kone (2013) Agricultural Potential of Biosolids Generated from Dewatering of Faecal Sludge on Unplanted Filter Beds.
- Lee Y., Park J., Ryu C., Gang K. S., Yang W., Park Y.-K., Jung J., Hyun S., 2013b, Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C, *Bioresource Technology*, 148,196–201.
- Misra, R. V., Roy, R. N., & Hiraoka, H. (2005). *Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole* (FAO). Rome: ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE.
- Miss, F. (2007). Etude des possibilités de valorisation des produits issus de traitement des boues de vidange : cas de Yaoundé, Cameroun. (Yaoundé, Cameroun: ENESAD).
- Molle, P. (2003). Filtres plantés de roseaux: limites hydrauliques et retention du phosphore. Génie des procédés. Montpellier, Université de Montpellier. **Doctorat:** 267.
- Molle, P., A.Liénard, et al. (2004). How to treat raw sewage with constructed wetlands: An overview of the French systems. 9Th International Conference on wetlands systems for water pollution control. Avignon, France.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

- Osei,R.A.,Karambiri H, Konate Y, Abagale FK, SOU/Dakoure M (2017) Macrophytes Potentials of Indigenous Plant Species for Faecal Sludge Constructed Wetland Treatment System : A Case in the Sudano-Sahelian Context. *International journal of Irrigation and Agricultural Development* 1(1), 91(105) : 2616-1508.
- Reymond, P. (2008). Elaboration d'une méthodologie permettant de déterminer l'option la plus durable pour le traitement des boues de vidange dans une ville moyenne d'Afrique subsaharienne - application à la ville de Sokodé, au Togo -.
- Sánchez, A., Gabarrell,, X., Artola, A., Barrena, R., Colón, J., Font, X., & Komilis, D. (2015). Composting of Wastes. *ResearchGate*, (280719443), 77 – 101. <https://doi.org/10.1201/b18680-6>
- Source:<https://www.plantezchezvous.com/blog/le-bambou-une-ressource-naturelle-auxmultiplesusages/~:targetText=Le%20tronc%20des%20bambous%20est,singes,%20bungalows,%20etc..>
- Strande L., Ronteltap M., Brdjanovic D. (Eds.) (2014). Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation. IWA Publishing. Édition français
- STRAU, M. KONE, D., KOANDA, D., STEINER, M. 9-12 Mai, 2006. Gestion des matières fécales urbaines. Situation, défis, et solutions prometteuses. Dakar Sénégal.
- Strauss, M., Larmie, S.A., Heinss, U., and Montangero, A. (2000). Treating faecal sludges in ponds. *Water Sci. Technol.* 42, 283–290.
- Tan Z., Qui J., Zeng H., Liu H., Xiang J., 2011, Removal of elemental mercury by bamboo charcoal impregnated with H₂O₂. *Fuel*, 90, 4, 1471–1475.
- Thies J. E., Rillig M. C., 2009, Characteristics of biochar: biological properties (Ch. 6). In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management*. Gateshead, UK, Earthscan, 85–105.
- Tilley, E., Luthi, C., Morel, A., Zurbrugg, C., and schertenleib, R. (2008). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*.
- Uggetti, E., Llorens, E., Pedescoll, A., Ferrer, I., Castellnou, R., Gracia, J., 2009. Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: characterization of three fullscale systems in Catalonia, Spain. *Bioresource Technology* **100**: 3882-389.
- UNICEF, and OMS (2009). Stratégie de prévention et de traitement de la diarrhée.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

- Wang, R., Korboulewsky, N., Prudent, P., Baldy, V., Bonin, G., 2009. Can vertical-flow wetland systems treat high concentrated from a food industry? A mesocom experiment testing three plant species. Ecological Engineering 35, 230-237.
- Zachariah EJ, Sabulal B, Nair DNK, Johnson AJ, Kumar CSP (2016) Carbon Dioxide Emission from Bamboo Culms. Plant Biology 18(3) : 400-405.

ANNEXES

Annexes 1: Utilisations possibles du bambou de chine après utilisation pour le traitement des BV.....	60
Annexes 2: Analyse physico-chimiques, microbiologiques et des parasites des boues de vidange utilisées pour alimenter les lits de séchages.	61
Annexe 3: Caractérisation du charbon de bambou la pyrolyse lente (500°C)	71
Annexes 4: Résultats détaillés des analyses physico-chimiques des boues de vidange	Erreur ! Signet non défini.
Annexes 5 : résultats détaillés des analyses microbiologiques des boues de vidange.....	77
Annexes 6 : Résultats détaillés des analyses physiques des boues de vidange	80
Annexes 7 : Correspondances_quartiers-ilots_ouagadougou (15-sept-13)	84

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Annexes 1: Utilisations possibles du bambou de chine après utilisation pour le traitement des BV

Le bois des chaumes, riche en silice, est très dur et très résistant tout en étant flexible. C'est pourquoi les bambous sont souvent utilisés comme matériau de construction. Mais on peut aussi les utiliser sous de multiples formes. Ses débouchés et utilisations sont nombreux !

✚ Au jardin

✚ **Plantes ornementales** : Les bambous sont recherchés comme plantes décoratives pour leur feuillage et leurs tiges. Le bruit provoqué par le vent à leur contact est un son très agréable. Ils sont souvent plantés au bord de pièces d'eau ou comme haies.

✚ **Tuteurs** : Pour vos tomates par exemple. Ils donnent une fière allure au potager !
Constructions diverses pour le jardin : pergolas, barrières, bancs, tonnelles, abris, objets de décoration...

✚ **Pour des constructions** : est utilisé pour sa résistance et sa légèreté pour construire d'impressionnants échafaudages, notamment pour la construction des gratte-ciels. Les bambous servent aussi à la construction de divers objets : meubles, parquet, cloisons, petites maisons, pilotis, ponts de singes, bungalows, etc...

✚ **Le dessin et la peinture** : Les bambous peuvent être utilisés pour produire de la pâte à papier, cet usage est très ancien en Chine. Ils sont également utilisés en dessin et en peinture, comme outil pour dessiner à l'encre de Chine.

✚ **Pour les textiles** : Grâce à des processus de fabrication proches de ceux de la pâte à papier, les pousses robustes des bambous peuvent se transformer en un tissu soyeux hautement absorbant et anti-bactérien.



Le tronc des bambous utilisé dans la construction



Le tronc des bambous utilisé comme meubles

Annexes 2: Analyse physico-chimiques, microbiologiques et des parasites des boues de vidange utilisées pour alimenter les lits de séchages.

I. Analyse physico-chimiques des boues de vidange

1. Détermination du pH, conductivité, température, potentiel rédox et l'oxygène dissous

Ces paramètres ont été mesurés dans les poly-tank utilisés pour le stockage des BV.

- Plonger le multiparamètre HI-9828 dans le poly-tank utilisé pour le stockage des BV (chaque paramètre a été mesuré 3fois).
- Appuyer « AR » puis « ENTER » et attendre jusqu'à stabilisation des valeurs du pH, de la conductivité, de temperature, potentiel rédox et l'oxygène dessous puis Relever la valeur du pH de la conductivité, de temperature, potentiel rédox et l'oxygène dessous

2. Analyse de la DBO₅

Après homogénéisation de l'échantillon de boues à analyser, prélever un volume de 90mL qu'on introduit avec précaution dans un flacon ambré ;

- Introduire un barreau magnétique dans le flacon ;
- Introduire 3 pastilles de soude dans un godet en caoutchouc et le placer dans le goulot du flacon ;
- Visser légèrement l'Oxitop numérique directement sur le flacon de manière étanche et appuyer simultanément sur le bouton gauche et droit présent sur l'Oxitop jusqu'à l'apparition du zéro ;
- Placer le flacon sur l'agitateur dans l'armoire thermorégulatrice à 20°C pendant 20 mn, puis appuyer simultanément sur le bouton gauche et droit présent sur l'Oxitop jussqu'à l'apparition du zéro ;
- L'Oxitop mémorise les valeurs toutes les 24h pendant 5 jours.

A l'issu des 5 jours, faire la lecture des résultats en utilisant le bouton droit sur l'Oxitop.

Les résultats s'expriment en mgO₂/L

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.



L'Oxitor numérique vissé sur le flacon



Oxitor placé dans l'armoire thermostatique

3. Analyse de la DCO

- Prélever 2 ml de l'échantillon et l'introduire dans le tube de minéralisation contenant préalablement de l'acide sulfurique et le dichromate de potassium. Agiter quelques secondes ;
- Pour le zéro, prélever 2 ml d'eau distillée et l'introduire dans le tube de minéralisation contenant préalablement de l'acide sulfurique et le dichromate de potassium. Agiter également pendant quelques secondes ;
- Placer les tubes dans le minéralisateur pendant 2h à 150° ;
- Laisser refroidir à la température ambiante après les 2h de minéralisation ;
- Bien nettoyer la paroi externe du tube et faire la lecture au colorimètre DR/890



Minéralisateur HACH DRB 200



Colorimètre DR/890

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

4. Détermination du Nitrate, du Nitrite, de l'Orthophosphate et de l'Azote ammoniacal par la méthode Spectrophotométrique.

L'appareil utilisé pour la lecture de ces paramètres est le spectrophotomètre HACH DR 3900.

Paramètres	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻
Réactifs	Nessler	Nitraver	Nitriver	Phosver
Dilution	1/100e	1/100e	1/100e	1/100e
Volume d'échantillon filtré à prélever (ml)	25	25	10	25
Volume de réactifs à introduire (ml)	1	25	10	25
Programmes	380	355	371	490
Temps d'agitation (minute)	Quelques secondes d'agitation	1	Quelques secondes d'agitation	Quelques secondes d'agitation
Temps de réaction (minute)	1	5	20	2

5. Détermination des MES, MS et MVS

a. Mesure des MES

- Peser le filtre GF/C à vide (P₀)
- Peser le creuset à vide (P_{0Cr})
- Mesurer un volume V (ml) et le filtrer sur le filtre GF/C
- Après filtration, déposer ensuite le filtre GF/C dans le creuset et le mettre à l'étuve à 105°C pendant 2h ;
- Laisser refroidir à la température ambiante et peser le creuset (P_{1Cr})
- La concentration en MES (mg/l) est alors égale à :

$$\text{MES (mg/L)} = \frac{[(P_{1Cr} - P_{0Cr}) - P_0]}{V} \times 10^6$$

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

b. Mesure des MVS

- Après peser du creuset sortie à l'étuve (P_{1Cr}), l'introduire dans le four à 550°C pendant 2h ;
- Laisser refroidir à la température ambiante et peser le creuset (P_{2Cr})

$$MVS \text{ (mg/L)} = \frac{[(P_{2Cr} - P_{0Cr}) - ((P_{1Cr} - P_{0Cr}))]}{V} \times 10^6$$

c. Mesure des MS

Les analyses des MS ont été faites au laboratoire par séchage à l'étuve à 105°C pendant 24H. Les relations données dans le tableau ci-dessous ont permis de calculer les différents paramètres.

Paramètres	Formules de calcul
Volume de l'échantillon de BV (50 mL)	V_{BV} (mesuré)
Masse du creuset vide	$P_{cr-vide}$ (mesuré)
Masse du creuset avec l'échantillon brut	$P_{cr+éch}$ (mesuré)
Masse du creuset avec l'échantillon sec	$P_{cr+échsec}$ (mesuré)

$$MS \text{ (mg/L)} = \frac{[(P_{Cr+échsec} - P_{Cr-vide})]}{V_{BV}} \times 10^6$$



Echantillon avant séchage à l'Etuve à 105°C



Echantillon après 2H séchage à l'Etuve à 105°C

6. Analyse de l'Azote Total Kjedhal (NTK)

La manipulation se déroule en trois (03) étapes :

a. Minéralisation

- Après homogénéisation de l'échantillon, prélever 50ml et l'introduire dans un tube Kjedhal, y ajouter 10 gels de silice (ou billes en verre) et 10ml d'acide sulfurique concentré ;
- Pour le blanc, introduire 100ml d'eau distillée dans un tube Kjedhal, y ajouter 10 gels de silice et 10ml d'acide sulfurique concentré ;
- Placer les tubes dans un minéralisateur BÜCHI B-414 et minéraliser successivement aux températures suivantes : 180°C pendant 2h, 250°C pendant 2h et enfin 340°C pendant 2h puis Laisser refroidir pendant 24h.

b. Distillation

- Placer l'échantillon minéralisé dans un distillateur BÜCHI K-355. A partir de ce dernier, ajouter 50ml de soude de concentration $C=400\text{g/L}$;
- Placer un erlenmeyer pour recueillir le distillat
- Distiller pendant 10 min ;

c. Titration

- Prélever un volume $V = 100\text{ml}$ du distillat et y ajouter 20ml d'acide orthoborique de concentration 20g/l ;
- Ajouter quelques gouttes de Rouge de Méthyle. On obtient une coloration bleue ;
- Titrer la solution avec de l'acide sulfurique 0.02N jusqu'au virage à la coloration jaune pâle ;
- Noter le volume (V) d'acide sulfurique utilisé pour le dosage.

La teneur en azote Kjedhal exprimée en milligramme de N par litre est donnée par l'expression:

$$\text{NTK (mg/L)} = \frac{[(V - V_0) \times 0.04 \times 14 \times 1000]}{V_1}$$

V : volume en millilitre d'acide sulfurique utilisé pour le dosage ;

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

V_0 : volume en millilitre d'acide sulfurique utilisé pour l'essai blanc ;

V_1 : volume en millilitre de la prise d'essai ; $V_1 = 100\text{ml}$.

II. Analyse microbiologique

1. Analyse des coliformes fécaux

a. Préparation du milieu de culture

- Laver à l'eau de robinet le plateau et la spatule. Rincer ;
- Peser 34,5g du milieu de culture (Chromocult coliforms Agar Es) à l'aide d'une balance;
- Prélever 1 litre d'eau distillée ;
- Mettre une petite quantité d'eau distillée dans le ballon puis mettre le milieu de culture (poudre) dans le ballon puis le reste d'eau distillée ;
- Introduire un barreau aimanté dans le ballon ;
- Recouvrir l'ouverture du ballon avec du papier aluminium ;
- Déposer le ballon sur la plaque chauffante puis régler l'appareil à 370 degré et à la vitesse de 3,5 m/s jusqu'à ébullition.
- Laisser refroidir jusqu'à la température ambiante.

b. Ensemencement en profondeur

- Etiqueter les boîtes de Pétri ;
- Faire des dilutions à partir de l'échantillon;
- Prélever 1ml de chaque dilution et déposer dans la boîte de Pétri ;
- Couler ensuite le milieu de culture dans la boîte de Pétri contenant l'échantillon et bien homogénéiser ;
- Laisser le contenu de la boîte se solidifier et renverser les boîtes ;
- Incuber à une température d'incubation de 44°C pendant 48 heures.

La concentration des bactéries se calcule par la formule suivante :

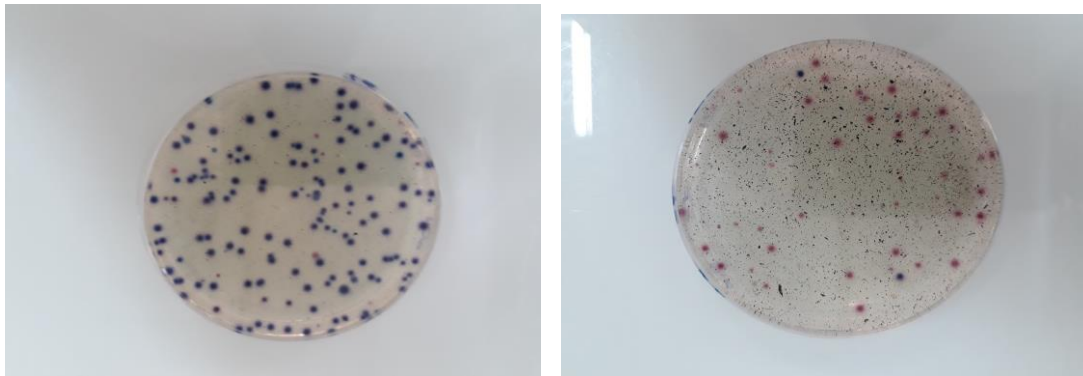
$$N(\text{UFC}/100\text{ml}) = \left(\frac{n}{v} \times d\right) \times 100$$

n : nombre de colonies comptées

v : volume de l'échantillon déposé dans la boîte

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

d : facteur de dilution



Coliformes Fécaux

2. Analyse des Streptocoques Fécaux

a. Préparation du milieu de culture

- Laver à l'eau de robinet le plateau et la spatule. Rincer ;
- Peser 33g du milieu de culture (Chromocult coliform Agar) à l'aide d'une balance;
- Prélever 1 litre d'eau distillée ;
- Mettre une petite quantité d'eau distillée dans le ballon puis mettre le milieu de culture (poudre) dans le ballon puis le reste d'eau distillée ;
- Introduire un barreau aimanté dans le ballon ;
- Recouvrir l'ouverture du ballon avec du papier aluminium ;
- Déposer le ballon sur la plaque chauffante puis régler l'appareil à 370 degré et à la vitesse de 3,5 m/s jusqu'à ébullition.
- Laisser refroidir jusqu'à la température ambiante.

b. Ensemencement en profondeur

- Etiqueter les boîtes de Pétri ;
- Faire des dilutions à partir de l'échantillon;
- Prélever 1ml de chaque dilution et déposer dans la boîte de Pétri ;
- Couler ensuite le milieu de culture dans la boîte de Pétri contenant l'échantillon et bien homogénéiser ;

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

- Laisser le contenu de la boîte se solidifier et renverser les boîtes ;
- Incuber à une température d'incubation de 37°C pendant 24 heures.

La concentration des bactéries se calcule par la formule suivante :

$$N(\text{UFC}/100\text{ml}) = \left(\frac{n}{v} \times d\right) \times 100$$

n : nombre de colonies comptées

v : volume de l'échantillon déposé dans la boîte

d : facteur de dilution



Streptocoques Fécaux

III. Analyse des parasites

1. Préparation des échantillons

- Bien homogénéiser les échantillons de boues de vidange ;
- Introduire une quantité de 1000 mL dans un puis stabiliser ;
- Laisser reposer pendant 24H ;
- Puis verser le surnageant et verser la partie décantée dans les tubes à centrifuger graduées ;
- Placer les tubes dans la centrifugeuse pendant 15 min pour 10 t/min, on obtient alors deux phases (solide et liquide) ;
- Verser la fraction liquide et conserver le dépôt ;

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

- Ajouter une fois le volume du dépôt en solution Acéto-acétique et deux fois le volume du dépôt en Ether, puis placer les tubes de nouveau dans la centrifugeuse pendant 15 min pour 10 t/min, on obtient alors trois phases (solide-liquide-solide) ;
- Verser les deux premières phases (solide-liquide) et conserver le dépôt solide ;
- Ajouter 5 fois le volume du dépôt en sulfate de zinc.



Cône gradué

2. Lecture des parasites

- Bien homogénéiser les échantillons déjà préparés ;
- Prélever 100 μ L de l'échantillon ;
- Placer les 0.1mL entre lame et lamelle ;
- Placer la lame et la lamelle sur le microscope trinoculaire à épifluorescence pour la lecture.

La formule du calcul de la concentration des œufs se présente comme suit :

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

N : la concentration des œufs d'helminthes

A : le nombre d'œufs comptés au microscope

P : volume total mis sur les lames

V : le volume initial de l'échantillon

X : volume du mélange culot-sulfate de Zinc

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.



Microscope trinoculaire à épifluorescence
avec caméra



Microscope trinoculaire à épifluorescence



Ascaris

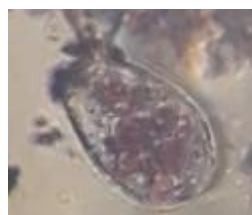


Ascaris lombricoïdes



Ascaris

oli



Ascaris



Ascaris lombricoïdes

Annexe 3: Caractérisation du charbon de bambou la pyrolyse lente (500°C)

❖ **Humidité**

La méthode proposée consiste à chauffer un échantillon de biocombustible solide préalablement broyé et tamisé à une température de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 2H. Le taux d'humidité est calculé à partir de la masse du résidu après chauffage à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. La méthode a été élaborée suivant les normes françaises NF V03-921. Le taux d'humidité, nommé W et exprimer en pourcentage sur la matière brute, est calculé à partir de la formule suivante :

$$W = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100$$

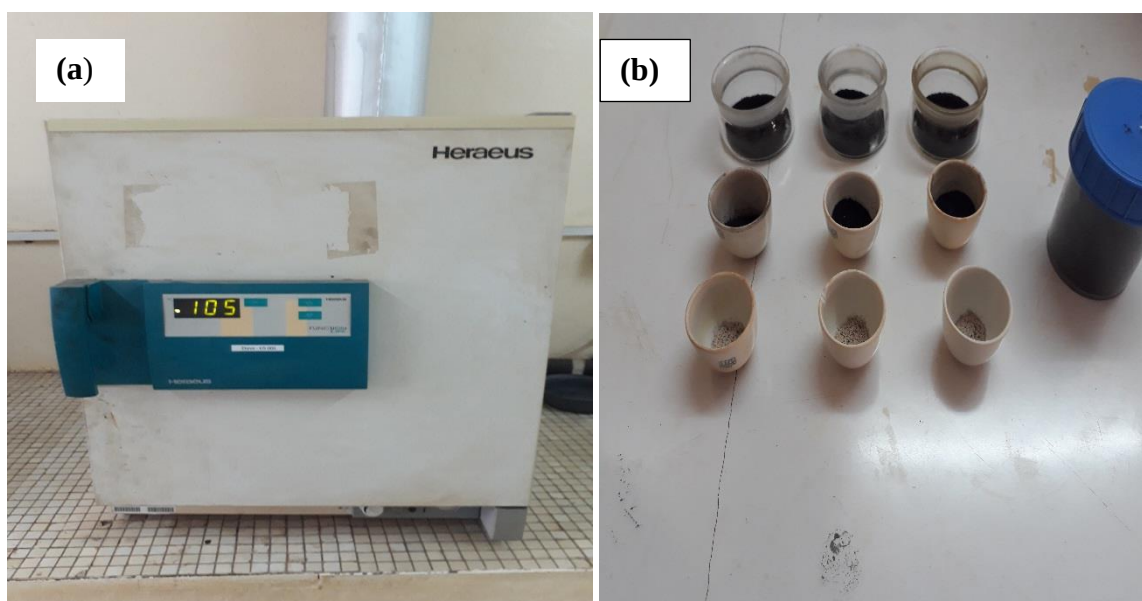
Où :

m_1 : La masse du creuset à vide, en gramme

m_2 : La masse du creuset avec l'échantillon, en gramme

m_3 : La masse du creuset et le résidu après chauffage à $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, en gramme.

W : Le taux d'humidité, en pourcentage.



(a): Etuve ventilée; (b): Echantillons destinés à l'étuve.

(a): Etuve ventilée; (b): Echantillons destinés à l'étuve.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

❖ Matières volatiles

La méthode proposée consiste à préchauffer le four à 900 °C, Puis à introduire un échantillon de biocombustible solide préalablement broyé et tamisé pendant 7 min. Le taux de matière sèche est calculé à partir de la masse du résidu après chauffage à 900 °C pendant 7 min. La méthode a été élaborée suivant les normes françaises NF V03-921. Le taux de matière volatiles, nommé V_s et exprimer en pourcentage sur la matière sèche, est calculé à partir de la formule suivante :

$$V_s = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} * 100$$

Où :

m_1 : La masse du creuset à vide, en gramme

m_2 : La masse du creuset avec l'échantillon, en gramme

m_3 : La masse du creuset et le résidu après chauffage à 900 °C, en gramme.

V_s : Le taux de matière volatile, en pourcentage.



Four a moufle



Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

❖ Le taux cendre

La méthode proposée consiste à incinérer un échantillon de biocombustible solide préalablement broyé et tamisé à une température de $815\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 4H. Le taux de cendre est calculé à partir de la masse du résidu après incinération à $815\text{ }^{\circ}\text{C}$. La méthode a été élaborée suivant les normes françaises NF V10-101. Le taux de cendre, nommé T_s et exprimer en pourcentage sur la matière brute, est calculé à partir de la formule suivante :

$$T_s = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100$$

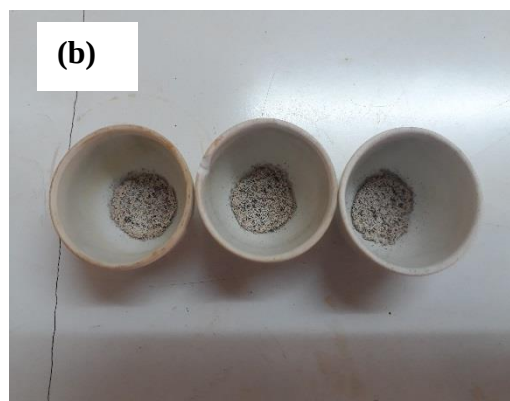
Où :

m_1 : La masse du creuset à vide, en gramme

m_2 : La masse du creuset avec l'échantillon, en gramme

m_3 : La masse du creuset et le résidu après chauffage à $815\text{ }^{\circ}\text{C}$, en gramme.

T_s : Le taux de cendre, en pourcentage.



(a) : Four à moufle; (b) : Résidus cendreux.

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Annexes 4: Résultats détaillés des analyses physico-chimiques des boues de vidange

Ech	pH	Eh (mV)	Cond (µs/cm)	Salinité	DCO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	N-NH ₃ ⁺ (mg/L)	TKN (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	PT (mg/L)	MES (mg/L)	MS (mg/L)	MVS (mg/L)
1	7,91	-65,2	6564	3,66	8245	750	1,7	9	195	63,42	40	1320	71990	834,5	303,5
2	7,89	-71,5	6890	3,64	8140	850	1,6	6	396	77,56	48	650	76515	304	130,5
3	7,87	-72,4	6780	3,79	1274	600	1,9	15	466	45,08	39	440	76650	337	64
4	7,81	-61,8	6902	3,76	1272	1000	1,7	11	582	44,38	48	400	17170	77420,00	77,5
5	7,8	-59,9	6815	3,81	7460	650	2,2	17	480	274,05	54	670	14388,5	76814,00	122
6	7,95	-48,6	6722	3,73	1318	450	1,9	26	550	290,5	44	400	1536	60550,00	85
7	7,78	-49,1	6766	3,01	1537	2350	0,021	12,8	470	285,25	0,56	810	1615	16314,00	27956
8	7,95	-23	7828	2,89	15310	2300	0,015	7,2	72	366,1	0,54	1540	72510	16570,00	27854
9	7,73	-21,5	7043	2,9	14080	1600	0,005	14,2	0,9	434,35	0,74	1140	77110	3702,00	23236
10	7,69	-23,1	7140	3,91	15810	2350	0,003	25,6	0,84	248,85	0,9	640	83530	3820,00	6268
11	7,7	-49,5	7024	3,57	11020	2400	0,03	13,5	1,58	381,85	0,73	730	17635	74606,00	6758
12	7,74	-43,4	6894	3,92	11280	1400	0,036	7,8	1,21	12,25	0,81	280	14325	81950,00	1246
13	8	-44,1	5672	3,9	2030	2400	0,021	14	1,27	123,55	0,88	330	1540	57498	1368
14	8,119	-35,5	5446	0,93	2920	2400	0,066	100	1,2	77,7	29	200	1925	52747,5	26996
15	8,13	-44,9	5465	0,88	1545	2400	0,012	10	1,69	24,01	43,2	230	74985	45163,5	29246
16	7,95	-36,4	7264	0,85	1228	1600	0,008	3,5	1,26	24,85	40,8	190	76305	1874,74	23635

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

17	7,92	-35,8	6686	1,02	962	1850	0,002	0,6	1,54	14,35	34,2	160	85270	1760	20345
18	7,74	-37	7279	0,97	1073	2000	0,002	1,3	1,7	71,4	49,6	160	17485	1420	17275
19	7,75	-47,2	7260	0,97	1170	1850	0,003	1,2	186	10,85	31,6	170	12020	1361	300
20	7,302	-60,8	1865	0,95	984	2100	0,006	1,4	163	61,81	30,2	190	1593,3	1554	545
21	7,28	-62,2	2095	1,2	14420	750	0,003	1	174	86,1	32,6	280	1755	1281	345
22	7,313	-61,9	1703	0,95	11370	350	0,007	2,2	159	123,2	22,8	120	635,5	1268	185
23	7,734	-60,6	2038	0,94	10910	350	0,002	1,1	138	26,6	43,6	16000	242	1194	480
24	7,635	-60,4	1952	0,95	10880	300	0,01	1,1	99	41,3	39,8	39000	89,5	1417	235
25	7,661	-61,1	1928	1,21	10580	400	0,006	1,5	128	37,8	66	25000	125,5	860	225
26	7,516	-60,9	1901	1,04	2445	2300	0,011	1,4	204	6,65	66	24500	200	1426	225
27	7,667	-60,3	2376	1,03	2230	2400	0,014	0,7	104	29,05	64	9500	110	1013	255
28	7,517	-60,9	1914	1,01	1380	2150	0,012	1,5	132	86,1	86	12000	58090	939,5	180
29	7,521	-60,9	1886	0,73	960	650	0,014	4,5	132	11,69	50	33000	55040	914	440
30	7,541	-62,2	1898	0,76	940	200	0,015	0,6	130	14	61	14000	53685	910	217,5
31	7,713	-62,9	2395	0,73	903	100	0,008	1,8	133	27,3	53	26000	49960	921,5	207,5
32	7,69	-70	2068	0,74	849	100	0,009	7,8	735	14	37	205	44930	960	192,5
33	7,72	-63,5	2059	0,72	849	250	0,016	1,1	639	98	70	151	43695	955	205

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

34	7,71	-95,7	2026	0,72	788	150	0,002	0,9	708	71,4	54	1050	855	4566	222,5
35	7,7	-68,3	1470	0,73	700	150	0,004	3,9	693	53,2	49	442	785	33270	210
36	7,69	-68,6	1543	0,72	649	200	0,001	0,8	712	99,4	31	329	455	4448	207,5
37	7,7	-92,5	1475	0,73	538	250	0,003	1,4	688	126,7	58	294	410	5336	425
38	7,7	-65	1501	4,49	503	650	0,2	30	524	27,65	103	230	365	6582	20570
39	7,69	-64	1449	4,04	482	800	0,1	20	636	78,4	51	850	325	5585	485
40	7,69	-95,7	1459	4,3	109	650	0,2	50	688	163,8	47	136	325	12790	1060
41	7,7	-65	1459	4,4	8350	200	0,1	50	680	119,35	144	930	245	4307	1610
42	7,72	-79,9	1459	4,56	1153	400	0,1	70	616	620,55	78	5100	220	4460	1190
43	7,73	-67,6	1469	4,34	8610	250	0,2	50	632	145,6	60	5340	124	17218	6160
44	7,86	-66,7	8190	4,67	2600	300	0,3	20	536	82,6	72	4365	654	4954	350
45	7,75	-84,41	7420	4,46	2690	300	0,2	40	600	113,4	99	11,8	275	4411	435
46	8,33	-82	7837	4,35	3190	300	0,2	40	608	146,3	81	166	187,5	4201	4770
47	7,83	-83	8021	4,73	8350	250	0,1	40	588	116,55	98	188	190	4251	7910
48	7,84	-82,1	8277	3,06	1153	250	0,3	40	560	126,7	65	266	180	4890	2170
49	8,27	-81,8	7958	3,36	8610	300	0,3	60	568	100,1	79	385	187,5	4880	16170
50	7,77	-82	8459	3,28	941	200	0,5	50	640	103,6	74	453	230	4910	16910

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Annexes 5 : résultats détaillés des analyses microbiologiques des boues de vidange

E coli. UFC/100mL	CF UFC/100mL	SF (UFC/100mL)
4,90E+04	5E+06	1E+05
6,70E+04	9E+06	2E+05
5,00E+01	9E+02	4E+04
3,00E+03	1E+04	1E+05
1,30E+02	1E+03	1E+05
2,00E+03	8E+04	5E+04
8,90E+05	1,48E+06	8,10E+05
4,80E+05	1,44E+06	8,40E+05
7,60E+05	1,72E+06	8,70E+05
8,40E+04	1,44E+05	1,30E+04
9,20E+04	2,00E+05	3,00E+03
9,20E+04	2,12E+05	3,60E+03
1,10E+05	2,10E+06	1,80E+03
1,00E+04	1,50E+04	1,40E+03
7,00E+03	9,00E+05	1,90E+03
1,16E+04	1,40E+05	4,80E+03
5,60E+04	1,08E+05	4,90E+03
7,00E+04	1,00E+05	5,20E+03
328000	372000	383000
336000	376000	336000
552000	672000	348000

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

516000	632000	375000
328000	372000	520000
392000	512000	324000
664000	968000	436000
328000	408000	224000
296000	400000	391000
2,10E+02	3,80E+02	5,90E+02
1,12E+05	1,16E+05	2,28E+05
1,00E+01	3,90E+02	4,00E+02
2,10E+03	2,30E+03	4,40E+03
2,90E+02	4,10E+02	7,00E+02
2,40E+02	2,90E+02	5,30E+02
1,28E+04	1,40E+04	2,68E+04
1,00E+01	5,00E+01	6,00E+01
6,00E+01	4,60E+02	5,20E+02
1,12E+04	1,20E+03	1,24E+04
1,50E+03	5,90E+02	2,09E+03
2,40E+03	1,44E+03	3,84E+03
2,80E+03	5,70E+02	3,37E+03
3,59E+14	3,59E+14	7,00E+06
1,066E+15	1,066E+15	5,27E+07
3,43E+14	3,43E+14	3,30E+07

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

1,2E+14	1,2E+14	3,25E+07
3,75E+14	3,75E+14	1,11E+07
1,77E+14	1,77E+14	1,06E+07
3,22E+14	3,22E+14	1,05E+07
3,09E+14	3,09E+14	5,85E+07
3,01E+14	3,01E+14	4,73E+07
1,36E+14	1,36E+14	4,96E+07

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Annexes 6 : Résultats détaillés des analyses physiques des boues de vidange

Ech	Pcr- vide	Pcr+sam ple	Pcr+Sam dry	MS (g)	[MS] mg/L	Pcr+sam dry	MV S (g)	[MVS] mg/L	TVS g/m l	TVS g/L	MV	Pcr+sam ple - Pcrvide	Pcr+Sam dry - Pcrvide	Pcr+Sam dry - Pcrvide	Sicci té DM g/ml)	Siccité DM g/L)	Siccité %	Vw	Vs	Mw	Te	Hv	Hv %	TVS%D M)
FS1	64,4 2	114,42	68,30	3,87	77420	66,01	2,28	45676	0,04 6	45,6 8	1000	50	3,87	3,87	0,07 7	77,42	7,742	0,05	922, 6	46,1	11,9	0,92	92,3	59,0
FS1	65,0 2	115,02	68,86	3,84	76814	66,37	2,49	49734	0,05 0	49,7 3	1000	50	3,84	3,84	0,07 7	76,81 4	7,681 4	0,05	923, 2	50,0	13,0	0,92	92,3	64,7
FS1	62,2 2	112,22	65,25	3,03	60550	63,16	2,09	41838	0,04 2	41,8 4	1000	50	3,03	3,03	0,06 1	60,55	6,055	0,05	939, 5	47,0	15,5	0,94	93,9	69,1
FS1	71,4 6	121,46	71,97	0,51	10152	71,66	0,31	6106	0,00 6	6,11	1000	50	0,51	0,51	0,01 0	10,15 2	1,015 2	0,05	989, 8	49,5	97,5	0,99	99,0	60,1
FS1	71,1 4	121,14	72,28	1,14	22732	71,33	0,95	18920	0,01 9	18,9 2	1000	50	1,14	1,14	0,02 3	22,73 2	2,273 2	0,05	977, 3	48,9	43,0	0,98	97,7	83,2
FS1	63,8 9	113,89	64,07	0,19	3702	63,94	0,13	2628	0,00 3	2,63	1000	50	0,19	0,19	0,00 4	3,702	0,370 2	0,05	996, 3	49,8	269, 1	1,00	99,6	71,0
FS1	61,0 3	111,03	61,22	0,19	3820	61,11	0,11	2168	0,00 2	2,17	1000	50	0,19	0,19	0,00 4	3,82	0,382	0,05	996, 2	49,8	260, 8	1,00	99,6	56,8
FS1	77,5 9	127,59	81,32	3,73	74606	79,03	2,29	45796	0,04 6	45,8 0	1000	50	3,73	3,73	0,07 5	74,60 6	7,460 6	0,05	925, 4	46,3	12,4	0,93	92,5	61,4
FS1	68,8 3	118,83	72,92	4,10	81950	71,13	1,80	35962	0,03 6	35,9 6	1000	50	4,10	4,10	0,08 2	81,95	8,195	0,05	918, 1	45,9	11,2	0,92	91,8	43,9
FS1	63,8 9	113,89	67,77	3,88	77530	65,13	2,64	52822	0,05 3	52,8 2	1000	50	3,88	3,88	0,07 8	77,53	7,753	0,05	922, 5	46,1	11,9	0,92	92,2	68,1
FS1	64,4 5	114,45	68,55	4,10	82006	65,63	2,92	58354	0,05 8	58,3 5	1000	50	4,10	4,10	0,08 2	82,00 6	8,200 6	0,05	918, 0	45,9	11,2	0,92	91,8	71,2
FS1	62,2 2	112,22	64,78	2,56	51102	63,13	1,65	33042	0,03 3	33,0 4	1000	50	2,56	2,56	0,05 1	51,10 2	5,110 2	0,05	948, 9	47,4	18,6	0,95	94,9	64,7
FS2	62,2 2	113,00	64,97	2,75	54990	63,96	1,01	20190	0,02 0	20,1 9	1015	50	2,75	2,75	0,05 5	54,99	5,499	0,05	960, 5	50,0	18,2	0,96	96,0	36,7
FS2	71,4 6	121,76	73,98	2,52	50416	73,05	0,94	18752	0,01 9	18,7 5	1006	50	2,52	2,52	0,05 0	50,41 6	5,041 6	0,05	955, 6	50,0	19,8	0,96	95,6	37,2
FS2	61,0 3	111,14	63,52	2,49	49782	62,59	0,93	18590	0,01 9	18,5 9	1002	50	2,49	2,49	0,05 0	49,78 2	4,978 2	0,05	952, 3	50,0	20,1	0,95	95,2	37,3

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

FS2	63,8 9	114,14	64,17	0,28	5564	64,07	0,10	1996	0,00 2	2,00	1005	50	0,28	0,28	0,00 6	5,564	0,556 4	0,05	999, 4	50,0	179, 7	1,00	99,9	35,9
FS2	77,5 4	127,84	77,61	0,07	1306	77,59	0,02	440	0,00 0	0,44	1006	50	0,07	0,07	0,00 1	1,306	0,130 6	0,05	1004 ,7	50,0	765, 7	1,00	100, 5	33,7
FS2	68,8 0	118,77	68,86	0,06	1134	68,84	0,02	384	0,00 0	0,38	999	50	0,06	0,06	0,00 1	1,134	0,113 4	0,05	998, 3	50,0	881, 8	1,00	99,8	33,9
FS2	64,4 2	114,95	64,47	0,04	846	64,45	0,01	258	0,00 0	0,26	1011	50	0,04	0,04	0,00 1	0,846	0,084 6	0,05	1009 ,8	50,0	1182 ,0	1,01	101, 0	30,5
FS2	71,1 4	121,44	71,22	0,08	1514	71,19	0,03	558	0,00 1	0,56	1006	50	0,08	0,08	0,00 2	1,514	0,151 4	0,05	1004 ,5	50,0	660, 5	1,00	100, 4	36,9
FS2	71,4 7	121,47	71,54	0,07	1420	71,49	0,05	974	0,00 1	0,97	1000	50	0,07	0,07	0,00 1	1,42	0,142	0,05	998, 6	50,0	704, 2	1,00	99,9	68,6
FS2	65,0 3	115,03	65,16	0,13	2630	65,08	0,08	1664	0,00 2	1,66	1000	50	0,13	0,13	0,00 3	2,63	0,263	0,05	997, 4	50,0	380, 2	1,00	99,7	63,3
FS3	62,2 3	112,23	62,26	0,03	648	62,24	0,02	308	0,00 0	0,31	1000	50	0,03	0,03	0,00 1	0,648	0,064 8	0,05	999, 4	50,0	1542 ,2	1,00	99,9	47,5
FS3	65,6 7	115,67	65,74	0,06	1226	65,71	0,03	554	0,00 1	0,55	1000	50	0,06	0,06	0,00 1	1,226	0,122 6	0,05	998, 8	50,0	815, 7	1,00	99,9	45,2
FS3	68,9 9	118,99	69,03	0,04	722	69,01	0,02	330	0,00 0	0,33	1000	50	0,04	0,04	0,00 1	0,722	0,072 2	0,05	999, 3	50,0	1384 ,0	1,00	99,9	45,7
FS3	63,8 9	113,89	63,96	0,07	1430	63,92	0,05	934	0,00 1	0,93	1000	50	0,07	0,07	0,00 1	1,43	0,143	0,05	998, 6	49,9	698, 3	1,00	99,9	65,3
FS3	64,4 3	114,43	64,46	0,04	712	64,45	0,02	334	0,00 0	0,33	1000	50	0,04	0,04	0,00 1	0,712	0,071 2	0,05	999, 3	50,0	1403 ,5	1,00	99,9	46,9
FS3	71,4 7	121,47	71,50	0,03	642	71,49	0,02	300	0,00 0	0,30	1000	50	0,03	0,03	0,00 1	0,642	0,064 2	0,05	999, 4	50,0	1556 ,6	1,00	99,9	46,7
FS3	68,8 1	118,81	68,85	0,03	684	68,83	0,02	328	0,00 0	0,33	1000	50	0,03	0,03	0,00 1	0,684	0,068 4	0,05	999, 3	50,0	1461 ,0	1,00	99,9	48,0
FS3	66,0 8	116,08	66,11	0,03	628	66,10	0,01	292	0,00 0	0,29	1000	50	0,03	0,03	0,00 1	0,628	0,062 8	0,05	999, 4	50,0	1591 ,4	1,00	99,9	46,5
FS3	65,0 2	115,02	65,05	0,03	636	65,04	0,01	282	0,00 0	0,28	1000	50	0,03	0,03	0,00 1	0,636	0,063 6	0,05	999, 4	50,0	1571 ,3	1,00	99,9	44,3
FS4	68,9 9	118,99	69,10	0,11	2196	69,07	0,04	738	0,00 1	0,74	1000,0 02	50	0,11	0,11	0,00 2	2,196	0,219 6	0,05	997, 8	50,0	455, 4	1,00	99,8	33,6
FS4	71,1	121,14	72,24	1,10	21946	71,49	0,75	15088	0,01	15,0	1000,0	50	1,10	1,10	0,02	21,94	2,194	0,05	978,	50,0	45,6	0,98	97,8	68,8

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

	4							5	9	02				2	6	6		1						
FS4	71,4 7	121,47	71,58	0,12	2332	71,54	0,04	842	0,00 1	0,84	1000,0 02	50	0,12	0,12	0,00 2	2,332	0,233 2	0,05	997, 7	50,0	428, 8	1,00	99,8	36,1
FS4	64,4 3	114,43	64,57	0,14	2898	64,51	0,06	1294	0,00 1	1,29	1000,0 02	50	0,14	0,14	0,00 3	2,898	0,289 8	0,05	997, 1	50,0	345, 1	1,00	99,7	44,7
FS4	65,0 2	115,02	65,23	0,20	4088	65,13	0,10	1920	0,00 2	1,92	1000	50	0,20	0,20	0,00 4	4,088	0,408 8	0,05	995, 9	50,0	244, 6	1,00	99,6	47,0
FS4	99,1 3	149,13	99,29	0,16	3260	99,22	0,07	1464	0,00 1	1,46	1000	50	0,16	0,16	0,00 3	3,26	0,326	0,05	996, 7	50,0	306, 7	1,00	99,7	44,9
FS4	77,5 4	127,54	78,06	0,52	10380	77,72	0,34	6778	0,00 7	6,78	1000	50	0,52	0,52	0,01 0	10,38	1,038	0,05	989, 6	50,0	96,3	0,99	99,0	65,3
FS4	64,4 5	114,45	67,07	2,63	52514	65,41	1,66	33164	0,03 3	33,1 6	1000	50	2,63	2,63	0,05 3	52,51 4	5,251 4	0,05	947, 5	50,0	19,0	0,95	94,7	63,2
FS4	71,1 5	121,15	74,13	2,98	59570	72,30	1,82	36412	0,03 6	36,4 1	1000	50	2,98	2,98	0,06 0	59,57	5,957	0,05	940, 4	50,0	16,8	0,94	94,0	61,1
FS4	65,0 4	115,04	67,90	2,87	57334	66,10	1,80	36062	0,03 6	36,0 6	1000	50	2,87	2,87	0,05 7	57,33 4	5,733 4	0,05	942, 7	50,0	17,4	0,94	94,3	62,9
FS5	68,8 2	117,66	69,09	0,27	5422	68,95	0,14	2866	0,00 3	2,87	977	50	0,27	0,27	0,00 5	5,422	0,542 2	0,05	971, 3	48,6	179, 1	0,97	97,1	52,9
FS5	71,1 5	113,18	73,16	2,01	50260	71,58	1,58	39552 ,5	0,04 0	39,5 5	841	40	2,01	2,01	0,05 0	50,26	5,026	0,04	800, 4	40,0	19,9	0,80	80,0	78,7
FS5	27,2 0	77,52	28,60	1,40	27988	27,79	0,81	16150	0,01 6	16,1 5	1007	50	1,40	1,40	0,02 8	27,98 8	2,798 8	0,05	978, 6	48,9	35,0	0,98	97,9	57,7
FS5	69,0 3	117,68	69,28	0,24	4884	69,15	0,13	2510	0,00 3	2,51	973	50	0,24	0,24	0,00 5	4,884	0,488 4	0,05	968, 1	48,4	198, 2	0,97	96,8	51,4
FS5	64,4 4	113,85	64,69	0,25	4982	64,56	0,13	2528	0,00 3	2,53	988	50	0,25	0,25	0,00 5	4,982	0,498 2	0,05	983, 2	49,2	197, 4	0,98	98,3	50,7
FS5	99,1 5	118,19	99,23	0,09	4455	99,18	0,05	2550	0,00 3	2,55	381	20	0,09	0,09	0,00 4	4,455	0,445 5	0,02	379, 1	19,0	212, 8	0,38	37,9	57,2
FS5	77,5 5	119,94	79,31	1,76	44060	78,35	0,96	19160	0,02 4	23,9 5	848	40	1,76	1,76	0,04 4	44,06	4,406	0,04	812, 6	40,6	23,1	0,81	81,3	54,4
FS5	71,5 1	114,39	73,50	2,00	49952 ,5	72,42	1,09	21744	0,02 7	27,1 8	858	40	2,00	2,00	0,05 0	49,95 25	4,995 25	0,04	817, 6	40,9	20,5	0,82	81,8	54,4
FS5	65,0 3	115,15	66,38	1,36	27100	65,62	0,77	15368	0,01 5	15,3 7	1002	50	1,36	1,36	0,02 7	27,1	2,71	0,05	975, 4	48,8	36,0	0,98	97,5	56,7

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

FS5	47,0 0	96,98	48,89	1,89	37852	47,43	1,46	29216	0,02 9	29,2 2	1000	50	1,89	1,89	0,03 8	37,85 2	3,785 2	0,05	961, 7	48,1	25,4	0,96	96,2	77,2
FS5	68,9 9	118,99	71,05	2,05	41090	69,93	1,12	22474	0,02 2	22,4 7	1000	50	2,05	2,05	0,04 1	41,09	4,109	0,05	958, 9	47,9	23,3	0,96	95,9	54,7
FS5	65,0 2	115,02	67,16	2,13	42688	65,79	1,37	27362	0,02 7	27,3 6	1000	50	2,13	2,13	0,04 3	42,68 8	4,268 8	0,05	957, 3	47,9	22,4	0,96	95,7	64,1
FS6	77,5 5	127,55	77,58	0,04	756	77,57	0,02	342	0,00 0	0,34	1000	50	0,04	0,04	0,00 1	0,756	0,075 6	0,05	999, 2	50,0	1321 ,8	1,00	99,9	45,2
FS6	69,0 0	119,00	69,06	0,06	1296	69,02	0,04	736	0,00 1	0,74	1000	50	0,06	0,06	0,00 1	1,296	0,129 6	0,05	998, 7	49,9	770, 6	1,00	99,9	56,8
FS6	66,0 8	116,08	66,17	0,09	1844	66,12	0,05	994	0,00 1	0,99	1000	50	0,09	0,09	0,00 2	1,844	0,184 4	0,05	998, 2	49,9	541, 3	1,00	99,8	53,9
FS6	64,4 4	114,44	64,72	0,28	5698	64,55	0,17	3440	0,00 3	3,44	1000	50	0,28	0,28	0,00 6	5,698	0,569 8	0,05	994, 3	49,7	174, 5	0,99	99,4	60,4
FS6	61,0 3	111,03	61,18	0,15	2994	61,09	0,09	1738	0,00 2	1,74	1000	50	0,15	0,15	0,00 3	2,994	0,299 4	0,05	997, 0	49,9	333, 0	1,00	99,7	58,0
FS6	62,2 3	112,23	62,54	0,32	6318	62,36	0,18	3582	0,00 4	3,58	1000	50	0,32	0,32	0,00 6	6,318	0,631 8	0,05	993, 7	49,7	157, 3	0,99	99,4	56,7
FS6	71,1 5	121,15	71,27	0,12	2376	71,20	0,07	1420	0,00 1	1,42	1000	50	0,12	0,12	0,00 2	2,376	0,237 6	0,05	997, 6	49,9	419, 9	1,00	99,8	59,8
FS6	65,6 8	115,68	65,74	0,07	1380	65,71	0,03	670	0,00 1	0,67	1000	50	0,07	0,07	0,00 1	1,38	0,138	0,05	998, 6	49,9	723, 6	1,00	99,9	48,6
FS6	68,8 1	118,81	68,87	0,06	1174	68,84	0,03	544	0,00 1	0,54	1000	50	0,06	0,06	0,00 1	1,174	0,117 4	0,05	998, 8	49,9	850, 8	1,00	99,9	46,3
FS6	63,8 9	113,89	64,15	0,26	5174	64,00	0,15	3070	0,00 3	3,07	1000	50	0,26	0,26	0,00 5	5,174	0,517 4	0,05	994, 8	49,7	192, 3	0,99	99,5	59,3
FS6	69,0 3	119,03	69,23	0,20	4006	69,06	0,18	3566	0,00 4	3,57	1000	50	0,20	0,20	0,00 4	4,006	0,400 6	0,05	996, 0	49,8	248, 6	1,00	99,6	89,0
FS6	77,5 5	127,55	77,83	0,28	5598	77,71	0,12	2402	0,00 2	2,40	1000	50	0,28	0,28	0,00 6	5,598	0,559 8	0,05	994, 4	49,7	177, 6	0,99	99,4	42,9
FS6	64,4 4	114,44	64,59	0,15	3084	64,49	0,10	2000	0,00 2	2	1000	50	0,15	0,15	0,00 3	3,084	0,308 4	0,05	996, 9	49,8	323, 3	1,00	99,7	64,9

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

Annexes 7 : Correspondances_quartiers-ilots_ouagadougou (15-sept-13)

Ilots	Secteurs	Quartiers
ilot A	1	Bilbalogo
	6	Gounghin sud - Gandin (Petit Paris)
	7	Goughin nord - Baoghin
ilot B	2	Saint Léon - Dapoya 1 - Quartiers Saints
	3	Koulouba - Zone Ministères et Ambassades (BV3)
	4	Kamsonghin - Cité an II - zone ZACA (aéroport)
	5	Samandin - Kouritenga - Mankoudougou
ilot C	8	Hamdalaye - Cité An III
	9	Ouidi - Kologhonaba - Larlé
	10	Nemnin – Niogsin (BV1)
	11	Dapoya II – Paspanga (BV4)
	13	Zongo
	14	Nonsin - Rimkiéta
	34	Zagtouli Nord - Zongo - Nabitenga
	35	Darsalam - Bassinko - Bissighin - Sogpelcé
ilot D	12	Camp militaire
	26	Pissy
	27	Pissy
	28	Pissy
	30	Nagrin
	31	Yaoghin
	32	Sandogo - Boassa - Kankamsin
	33	Zagtouli sud
ilot E	25	Cissin
	52	Pâte d'oie
ilot F	29	Kouritenga
	54	Ouaga 2000 (côté Libya hôtel)
	55	Kossyam
ilot G	24	Dagnoen - Ronsin (1200 logements) - Kalgodin
	48	Dayongo
	49	Balkuy

Traitement des boues de vidange par lits de séchage plantés en utilisant le charbon de bambou comme conditionneur physique sous climat soudano-sahélien.

	50	Lanoayiri
	51	Karpala
	53	Ouaga 2000 (côté ambassade USA)
ilot H	23	Zogona – Wemtenga (BV2)
	44	Dassasgho
	45	Taabtenga
	46	Dassasgho
	47	Yamtenga - Ouidtenga
ilot I	22	Zone du Bois
ilot J	22	Zone du Bois
ilot K	21	Wayalghin
	41	Kossodo - Nioko II
	42	Wayalghin - Nioko I – Godin (BV6)
	43	Dassasgho (BV5)
ilot L	15	Tampouy
	16	Kilwin
	17	Tanghin
	18	Sambin barrage
	19	Zone industrielle Kossodo - Nioko II - Polesgo
	20	Sogdin - Polesgo - Tabtenga
	36	Silmiougou - Gantin - Silmiyiri
	37	Marcoussis - Bissighin - Yagma
	38	Yagma - Ouapassi
	39	Bangpooré - Wobriguéré
	40	Kamboissin - Sakoula