

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
UNIVERSITY OF YAOUNDE I



FACULTE DES SCIENCES
FACULTY OF SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VEGETALES
DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY

**Évaluation de la composition physico-chimique et biologique des boues
issues du traitement des eaux usées de savonnerie et de raffinerie de
PAFIC SARL, en vue de leur valorisation potentielle comme
amendement agricole pour la culture du maïs, du soia et du manioc**

*Mémoire présenté et soutenu en vue de l'obtention du Master Professionnel
en Sciences de l'Environnement*

Option : Assainissement et Restauration de l'Environnement

Par :

NGUIMGO-DONGMO Roni-Laurence

Licenciée ès Biochimie

Matricule : 22W2539



Sous :

L'encadrement de :

Mme VOMO Ange
Responsable QHSE à PAFIC SARL

La supervision de :

TONFACK Libert Brice
Maitre de Conférences

ANNEE ACADEMIQUE 2024-2025

DÉDICACE

A la grande famille VOUFO & M. et Mme DEMANOU

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Département de Biologie et Physiologie Végétales de l'Université de Yaoundé I sous la supervision du Professeur TONFACK Libert Brice et à PAFIC SARL sous la supervision de Mme VOUMO Ange.

Je remercie très humblement le Dieu tout puissant sans qui ce travail n'aurait jamais existé. Je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail et plus particulièrement :

- Pr AMBANG Zachée, Chef de Département de BPV qui ne ménage aucun effort pour le rayonnement dudit département par un scientisme de rigueur et la qualité des enseignements dispensés ;
- Professeur DJOCGOUE Pierre François coordonnateur de la filière Science de l'Environnement à l'Université de Yaoundé I et tous nos différents enseignants pour leur disponibilité ;
- Pr TONFACK Libert Brice, mon encadreur académique pour son assistance, sa disponibilité et ses conseils ;
- Mme VOUMO ANGE, QHSE de PAFIC Sarl pour sa disponibilité, son assistance et ses conseils ;
- Monsieur ATABONG AGENDIA Paul pour son aide dans les analyses des échantillons et ses conseils pratiques.
- Les employés de PAFIC pour leur accueil convivial et leurs conseils lors du stage ;
- Tous les étudiants de ma promotion, pour leurs conseils et leur aide et leur disponibilité durant toute la formation ;
- Tous mes amis pour leur soutien ;
- Ma maman VOUFO THERESE et mes frères et sœurs pour leur soutien psychologique, leur conseil, leur amour, et leur soutien financier ;
- Le couple DEMANOU pour son assistance, ses conseils et son amour tout au long de ce travail ;
- Mme KANA BENELL Anne Esther, Délégué Régional du MINEPDED /CE pour son aide pratique, ses conseils et son amour tout au long de ce travail.
- Je remercie Mme Halimatu HAMAN pour son soutien.

TABLE DE MATIERES

DÉDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DE MATIERES.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
SIGLES ET ABREVIATIONS	x
RESUME.....	xi
ABSTRACT	xii
CHAPITRE I : GENERALITE	1
I.1. INTRODUCTION	1
I.2. REVUE DE LA LITTERATURE	4
I.2.1. Eaux usées industrielles et caractéristiques des boues.....	4
I.2.1.2. Vue d'ensemble des composants physico-chimiques et biologiques	4
I.2.1.3. Polluants typiques	4
I.2.2. Facteurs influant sur la composition des boues	5
I.2.2.1. Processus de production dans les savonneries et les raffineries	5
I.2.2.1.1. Les savonneries.....	5
I.2.2.1.2. Les raffineries.....	6
I.2.2.2. Influence des technologies de traitement des eaux usées	6
I.2.2.2.1. Le Traitement primaire	6
I.2.2.2.2. Le Traitement secondaire.....	6
I.2.2.2.3. Le Traitement tertiaire	7
I.2.3. Analyse physico-chimique et microbiologique des boues.....	7
I.2.3.1 Principales propriétés physico-chimiques.....	7
I.2.3.1.1. Paramètres physico-chimiques des boues	7
I.2.3.1.1.1. Le pH	7
I.2.3.1.1.2. Matière organique (MO)	7
I.2.3.1.1.3. Teneur en éléments nutritifs.....	7
I.2.3.1.1.4. Métaux lourds	8
I.2.3.2 Propriétés microbiologiques	8
I.2.3.2.1. Microorganismes bénéfiques versus pathogènes	8
I.2.3.2.1.1. Microorganismes bénéfiques	8
I.2.3.2.1.2. Microorganismes pathogènes.....	8

I.2.3.2.2. Risques sanitaires associés aux pathogènes	9
I.2.3.2.2.1. Exposition directe	9
I.2.3.2.2.2. Contamination des ressources	9
I.2.3.2.2.3. Bioaérosols.....	9
I.2.3.3. Techniques d'hygiénisation	9
I.2.4. Risques environnementaux et agronomiques liés à l'utilisation des boues	10
I.2.4.1 Préoccupations environnementales	10
I.2.4.1.1. Contamination des sols et accumulation de métaux lourds	10
I.2.4.1.2. Impact sur les eaux superficielles par lixiviation ou ruissellement	11
I.2.4.2 Défis agronomiques	11
I.2.4.2.1. Risques de transfert de pathogènes vers les cultures	11
I.2.4.2.2. Équilibre entre disponibilité des nutriments et toxicité	11
I.2.5. Applications agricoles des boues industrielles	12
I.2.5.1. Avantages de l'utilisation des boues comme engrais	12
I.2.5.1.1. Amélioration de la fertilité et de la structure des sols.....	12
I.2.5.1.2. Contribution à une gestion durable des déchets.....	13
I.2.5.2 Études de cas sur l'utilisation des biosolides	13
I.2.5.2.1. Exemples d'applications réussies dans des contextes similaires.....	13
I.2.5.2.2. Leçons apprises et bonnes pratiques	14
I.2.6. Zones agroécologiques au Cameroun	14
I.2.6.1. Zone de la savane soudano-sahélienne	14
I.2.6.2. Zone de la savane soudano-guinéenne.....	15
I.2.6.3. Zone de forêt tropicale humide	15
I.2.6.4. Zone des hautes terres de l'ouest	15
I.2.6.5. Zone côtière	15
I.2.7. Cadres réglementaires et politiques	16
I.2.7.1 Normes pour la réutilisation des boues en agriculture.....	16
I.2.7.1.1. Directives internationales et régionales	16
I.2.7.1.2. Conformité avec les réglementations locales au Cameroun	16
I.2.7.2 Défis dans la mise en œuvre	17
I.2.7.2.1. Écarts entre la politique et la pratique.....	17
I.2.7.2.2. Implication des parties prenantes et besoins en renforcement des capacités.....	17
I.2.8. Présentation de la structure d'accueil.....	17
I.2.8.1. Historique.....	18

I.2.8.2. Objectifs	18
I.2.8.3. Situation géographique	18
I.2.8.4. Fiche signalétique	19
I.2.8.5. Structure et fonctionnement de l'entreprise	21
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	22
II.1. Localisation du site d'étude	22
II.2. Matériel utilisé	23
II.3. Méthodes	24
II.3.1. Évaluation des pratiques actuelles de gestion des eaux usées et des boues à PAFIC SARL	24
II.3.2. Analyse des caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des boues issues du traitement des eaux usées	24
II.3.2.1. Collecte des échantillons	24
II.3.2.2. Analyse physico-chimique	25
II.3.2.2.1. Mesure du pH	25
II.3.2.2.2. Mesure de la conductivité, de la salinité, des solides totaux dissous et de la température	25
II.3.2.2.3. Minéralisation	26
II.3.2.2.4. Dosage de l'azote total	26
II.3.2.2.5. Dosage du phosphore	26
II.3.2.2.6. Dosage du potassium	27
II.3.2.2.7. Dosage du cadmium	27
II.3.2.2.8. Dosage du chrome	27
II.3.2.2.9. Dosage du fer	28
II.3.2.2.10. Dosage du plomb	28
II.3.2.2.11. Dosage du zinc	29
II.3.2.3. Analyse microbiologique	29
II.3.3. Identification des risques environnementaux et agronomiques potentiels liés à l'utilisation des boues comme amendement	30
II.3.3.1. Normes locales et internationales	30
II.3.3.2. Directives environnementales et protection des ressources en eau	30
II.3.4. Proposition des recommandations pour la valorisation des boues comme fertilisants, en tenant compte des besoins des cultures de maïs, de soja et de manioc	31
II.3.4.1. Évaluation des besoins des cultures	31

II.3.4.2. Analyse des zones agro-écologiques en fonction des spéculations	31
II.3.4.2.1. Cas du maïs.....	32
II.3.4.2.2. Cas du soja (Glycine max (L.))	34
II.3.4.2.2. Cas du manioc (Manihot esculenta)	34
II.3.4.3. Recommandations pratiques.....	35
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	36
III.1. Résultats	36
III.1.1. Pratiques actuelles de gestion des eaux usées et des boues à PAFIC SARL	36
III.1.1.1. Description des secteurs d'activités	36
III.1.1.1.1. Secteur d'activité de la savonnerie	36
III.1.1.1.2. Secteur d'activité de la cosmétique	36
III.1.1.1.3. Secteur d'activité de production du plastique	36
III.1.1.1.4. Secteur d'activité de production de boissons	37
III.1.1.1.5. Département de raffinerie.....	37
III.1.1.1.6. Département de Production de Margarine.....	37
III.1.1.2. Fonctionnement.....	38
III.1.1.3. Fournisseurs de matières premières et intrants.....	38
III.1.1.3.1. Fournisseurs locaux.....	38
III.1.1.3. 2. Fournisseurs internationaux	38
III.1.1.4. Gestion des déchets	39
III.1.1.4.1. Gestion des déchets solides	39
III.1.1.4.1.1. Pré-collecte.....	39
III.1.1.4.1.2. Collecte.....	39
III.1.1.4.1.3. Tri	39
III.1.1.4.1.4. Stockage	39
III.1.1.4.1.5. Enlèvement.....	40
III.1.1.4.2. Gestion des déchets liquides	41
III.1.1.4.2.1. Huiles usées.....	41
III.1.1.4.2.2. Eaux usées	41
III.1.1.4.2.3. Caractéristiques de la station de traitement :	41
III.1.1.4.3. Processus de traitement des eaux usées :	41
III.1.1.4.3.1. Prétraitements.....	42
III.1.1.4.3.2. Traitement secondaire (physico-chimique).....	43
III.1.1.4.4. Traitements des boues	44

III.1.2. Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des boues issues du traitement des eaux usées	45
III.1.2.1. Caractéristiques physico-chimiques et potentiel agronomique	45
III.1.2.2. Caractéristiques microbiologiques et risques environnementaux	47
III.1.3. Recommandations et plan de gestions pour la valorisation des boues comme fertilisants des cultures de maïs, de soja et de manioc dans les zones agro-écologique au Cameroun	48
III.1.3.1. Quantité des boues produites par PAFIC SARL Pendant le stage	48
III.1.3.2. Recommandations pour la valorisation des boues comme fertilisants des cultures de maïs, de soja et de manioc dans les zones agro écologiques au Cameroun	49
III.1.4.2. Plan de gestion pour la valorisation des boues comme fertilisants des cultures de maïs, de soja et de manioc dans les zones agroécologiques au Cameroun	51
III.2. Discussions	58
III.2.1. Pratiques actuelles de gestion des eaux usées et des boues à PAFIC SARL	58
III.2.2. Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des boues	59
III.2.3. Risques environnementaux et agronomiques liés à l'utilisation des boues.....	59
III.2.4. Recommandations et plan de gestion pour la valorisation des boues en agriculture	60
CHAPITRE IV : CONCLUSION, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	62
IV.1. Conclusion	62
IV.2. Perspectives.....	63
V.3. Recommandations	63
BIBLIOGRAPHIE	64
ANNEXES	69

LISTE DES FIGURES

Fig. 1. Situation géographique de pafic sarl (google earth)	19
Fig. 2. Structure de l'entreprise.....	21
Fig. 3. Site d'étude	22
Fig. 4. Collecte de l'échantillon de biosolide.....	25
Fig. 5. Cartographie des différentes zones agro-écologiques du Cameroun.....	32
Fig. 6. Exemple de savon de ménage produit par PAFIC.	36
Fig. 7. Boissons de PAFIC	37
Fig. 8. Huile raffinée de marque PAFIC OR, produite dans le département de raffinerie.....	37
Fig. 9. Bacs distincts prévus pour les déchets dangereux	40
Fig. 10 .Bacs des déchets non dangereux.....	40
Fig. 11. L'enlèvement des déchets dangereux et non dangereux.....	41
Fig. 12 .Séparation des sables et autres particules solides	42
Fig. 13. Déshuilage à l'aide d'un recaleur	42
Fig. 14. Présentation du sulfate d'aluminium	43
Fig. 15. Image du bac de sédimentation.....	43
Fig. 16 . Séchage des boues.....	44
Fig. 17. Collecte et présentation d'un échantillon de boue sèche	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Principaux composants physico-chimiques et polluants typiques des boues des savonneries et raffineries.....	5
Tableau II. Techniques d'hygiénisation appliquées aux boues afin de réduire la charge pathogène	10
Tableau III. Risques Environnementaux et Agronomiques Associés à l'Utilisation des Boues	12
Tableau IV. Fiche signalétique de la structure	20
Tableau V. Matériel utilisé.....	23
Tableau VI. Expérimentations de la culture de maïs par zone agro écologique	33
Tableau VII. Expérimentations du soja avec le compost par zone agro écologique.....	34
Tableau VIII. Expérimentations de la culture de maïs par zone agro écologique.....	35
Tableau IX. Caractéristiques physicochimiques des boues issues de la station de traitement de PAFIC SARL	46
Tableau X. Caractéristiques microbiologiques des boues issues de la station de traitement de PAFIC SARL	48
Tableau XI. Volume des boues produites par PAFIC SARL sur 4 mois	48
Tableau XII. Besoins en termes de boues par zone Agro écologique en t/ha	50
Tableau XIII. Plan de gestion pour la valorisation des boues	52

SIGLES ET ABREVIATIONS

DBPV : Département de Biologie et Physiologie Végétales.

FAO: Food and Agriculture Organization.

IRAD : Institut de recherche agricole pour le développement.

MES : Matière en suspension.

MINADER : Ministère de l'agriculture et du développement rural.

MINEPDED : Ministère de l'environnement, de la protection de la nature et du développement durable.

MINMIDT : Ministère des mines, de l'industrie et du développement technologique.

PAFIC : Le Partenaire Financier avec Christ.

SOCAPALM : Société Camerounaise des Palmeraies.

RESUME

Au Cameroun, la gestion insuffisante des eaux usées industrielles entraîne la pollution et des risques sanitaires. L'utilisation des boues comme engrais pourrait réduire les coûts de gestion des déchets et répondre à la demande croissante en fertilisants, cependant leur application est freinée par le manque de données sur leur composition. PAFIC SARL une industrie de savonnerie et agroalimentaire située au Cameroun émet une volonté d'utiliser les boues produites au sein de son entreprise comme amendement agricole pour produire sa matière première (maïs, manioc...). Cette étude évalue le potentiel d'utilisation des boues d'épuration de l'usine de traitement des eaux usées de PAFIC SARL comme fertilisant pour les cultures, notamment le maïs, le soja et le manioc, en analysant leurs caractéristiques physiques, chimiques et microbiologiques. L'entreprise comporte plusieurs secteurs d'activités qui génèrent des eaux usées industrielles, notamment la production de savon, de cosmétiques, la fabrication de plastique, de boissons et de raffinage d'huile. Les eaux usées de ces secteurs d'activités subissent un processus de traitement en plusieurs étapes, comprenant un prétraitement (criblage manuel, élimination du sable), une coagulation primaire et un traitement physico-chimique secondaire utilisant du sulfate d'aluminium. Les boues obtenues ont été analysées et les résultats obtenus sont : le pH (6,82), la conductivité (465 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et la teneur en éléments nutritifs (azote total : 165 mg/kg, phosphore : 325 mg/kg). Les métaux lourds étaient : le zinc (349 mg/kg), le plomb (3,108 mg/kg) et le chrome (20,4 mg/kg), bien qu'ils respectent les limites agricoles acceptables. L'analyse microbiologique a révélé des niveaux modérés de coliformes fécaux (240 UFC/100 ml), de streptocoques (153 UFC/100 ml) et la présence de *Salmonella* (3 UFC/5L), ce qui pose des risques sanitaires potentiels pour les cultivateurs et les consommateurs si ces boues sont utilisées en Agriculture. Les recommandations pour l'utilisation sûre de ces boues comme amendement organique incluent un traitement adéquat tel que le compostage et un suivi afin de réduire les risques microbiologiques et d'ajuster l'accumulation potentielle de métaux lourds. Les résultats soulignent le potentiel de ces boues pour enrichir les sols en éléments nutritifs essentiels, bien que des précautions soient nécessaires pour prévenir les risques environnementaux et sanitaires, notamment dans les zones sensibles à la contamination par les métaux lourds. Les résultats révèlent l'importance de la conformité réglementaire en matière de norme agronomique et de norme sur la protection des eaux et des stratégies de traitement des boues pour une utilisation agricole durable.

Mot clés : Gestion des eaux usées, boues industrielles, amendement agricole, caractéristiques physico-chimiques, risques environnementaux.

ABSTRACT

This study assesses the potential for using biosolids from PAFIC SARL's wastewater treatment plant as a fertilizer for crops, including maize, soybean, and cassava, by analyzing their physical, chemical, and microbiological characteristics. The company has multiple activities sectors generating industrial wastewater, including soap production, cosmetics, plastic manufacturing, beverages, and oil refining. Wastewater from these activities sectors undergoes a multi-stage treatment process involving pre-treatment (manual screening, sand removal), primary coagulation, and secondary physico-chemical treatment using aluminum sulfate. The biosolids produced were collected and analyzed for key parameters such as pH (6.82), conductivity (465 $\mu\text{S}/\text{cm}$), and nutrient content (total nitrogen: 165 mg/kg, phosphorus: 325 mg/kg). Notably, heavy metals were present, including zinc (349 mg/kg), lead (3.108 mg/kg), and chromium (20.4 mg/kg), although they were within acceptable agricultural limits. Microbiological analysis revealed moderate levels of fecal coliforms (240 UFC/100 ml), streptococci (153 UFC/100 ml), and the presence of *Salmonella* (3 UFC/5L), which poses potential sanitary risks for agricultural use. Recommendations for the safe use of these biosolids as a soil amendment include ensuring proper treatment and monitoring to mitigate microbiological risks and adjusting for potential heavy metal accumulation. The results highlight the potential of these biosolids to enrich soils with essential nutrients, although precautions are necessary to prevent environmental and health hazards, particularly in areas sensitive to heavy metal contamination. The findings underscore the importance of regulatory compliance and tailored treatment strategies for sustainable agricultural use.

Keywords: Wastewater management, industrial sludge, agricultural amendment, physicochemical characteristics, environmental risks.

CHAPITRE I : GENERALITE

I.1. INTRODUCTION

La gestion des eaux usées et le traitement des boues représentent des enjeux environnementaux majeurs, notamment dans des secteurs industriels tels que la fabrication de savon et les raffineries. Ces industries génèrent des volumes importants d'eaux usées, nécessitant un traitement avant leur rejet dans l'environnement. Les processus de traitement produisent des boues, riches en nutriments et en matière organique, qui peuvent être envisagées pour une utilisation agricole. Cependant, leur réutilisation efficace et sûre dépend d'une compréhension approfondie de leur composition et des risques potentiels qu'elles peuvent poser lors de leur application sur les sols et les cultures. Ces dernières décennies, la demande croissante pour des pratiques agricoles durables a stimulé l'intérêt pour la réutilisation des boues en tant qu'engrais et amendements organiques. Ces boues, sous-produits solides du traitement des eaux usées, sont riches en matières organiques et en nutriments comme l'azote, le phosphore et le potassium, essentiels pour améliorer la fertilité des sols et favoriser la croissance des cultures (USEPA, 2020). Toutefois, leur utilisation présente des défis. La composition des boues varie selon la source des eaux usées, les méthodes de traitement utilisées, et la présence de contaminants tels que les métaux lourds, les agents pathogènes et les produits pharmaceutiques (Elliott & Mahmoud, 2018). Il est donc crucial de caractériser ces boues, notamment leurs propriétés physico-chimiques et biologiques, afin d'évaluer leur sécurité et leur efficacité en tant qu'amendements agricoles.

Dans des pays en développement comme le Cameroun, la gestion des eaux usées industrielles et des boues résultantes est souvent insuffisante, ce qui conduit à la pollution de l'environnement et à des risques pour la santé publique. La réutilisation des boues agricoles pourrait répondre à la demande croissante en engrais tout en réduisant les coûts liés à la gestion des déchets. Cependant, le manque de données sur les caractéristiques des boues provenant de secteurs spécifiques comme la fabrication de savon et les raffineries freine leur utilisation dans l'agriculture (Nzouankeu et *al.*, 2022). Une meilleure compréhension de leur composition est essentielle pour évaluer leur potentiel comme engrais, en particulier pour des cultures de base comme le maïs, le soja et le manioc, des aliments essentiels au Cameroun et en Afrique de l'Ouest (Tchamitchian et *al.*, 2020). Le Cameroun est caractérisé par une grande diversité agroécologique, divisé en cinq zones agroécologiques principales, déterminées par le climat, l'altitude, les types de sols et les cultures pratiquées. Par exemple, les plaines côtières humides conviennent à des cultures comme le manioc, tandis que les

Hauts Plateaux de l'Ouest, avec leurs sols volcaniques fertiles, sont propices au maïs. L'application des boues doit tenir compte des spécificités de chaque zone, notamment les propriétés des sols et les besoins des cultures. Bien que les boues puissent fournir des nutriments importants, leurs effets peuvent varier en fonction des caractéristiques locales des sols et des risques de contamination (Tchamitchian et *al.*, 2020). Il est donc essentiel d'étudier la composition des boues en relation avec les zones agroécologiques du Cameroun pour garantir leur utilisation sûre et efficace. De nombreuses études ont déjà démontré le potentiel des boues pour améliorer la qualité des sols et augmenter les rendements agricoles, notamment dans les pays développés (Cohen et *al.*, 2020). Toutefois, dans les pays à revenu faible ou intermédiaire, les risques associés à leur application, tels que la contamination par les métaux lourds et les agents pathogènes, restent préoccupants. L'absence de directives standardisées et de données locales complètes complique la mise en œuvre de pratiques de réutilisation sûres (Chakraborty et *al.*, 2019). Face à la demande croissante pour une agriculture durable et au besoin d'alternatives aux engrais chimiques, la réutilisation des boues pourrait jouer un rôle essentiel dans l'amélioration de la fertilité des sols et l'augmentation des rendements agricoles. Cependant, sans études complètes sur leur composition, leur utilisation sûre et efficace demeure incertaine.

Cette étude cherche à combler cette lacune en caractérisant les boues de la PAFIC SARL et en évaluant leur adéquation pour les cultures de maïs, soja et manioc dans les différentes zones agro écologiques du Cameroun. Les résultats fourniront des données essentielles pour orienter la réutilisation sûre des boues et contribuer à l'élaboration de lignes directrices pour leur gestion durable. Le présent travail a pour objectif général l'Évaluation la composition physico-chimique et biologique des boues issues du traitement des eaux usées des savonneries et des raffineries de PAFIC SARL, en vue de leur valorisation potentielle comme amendement agricole pour la culture du maïs, du soja et du manioc. Les objectifs spécifiques assignés à ce travail sont:

- Évaluer les pratiques actuelles de gestion des eaux usées et des boues à PAFIC SARL,
- Analyser les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des boues issues du traitement des eaux usées en rapport avec les risques environnementaux et le potentiel agronomique lié à l'utilisation des boues comme amendement.
- Elaborer une stratégie de valorisation pour l'utilisation des boues comme fertilisants, en tenant compte des besoins des cultures de maïs, de soja et de manioc ainsi que des réglementations locales.

De ces objectifs, se dégagent les hypothèses suivantes :

- Les pratiques actuelles de gestion des eaux usées et des boues à PAFIC SARL sont insuffisantes pour garantir une valorisation optimale et durable des boues dans un contexte agricole.
- Les boues issues du traitement des eaux usées de PAFIC SARL présentent des propriétés physico-chimiques et microbiologiques compatibles avec une utilisation potentielle comme amendement agricole pour le maïs, de soja et de manioc sous certaines conditions.
- La valorisation des boues comme fertilisants est réalisable en respectant les besoins spécifiques des cultures de maïs, de soja et de manioc, ainsi que les réglementations locales, à condition d'adopter des pratiques de gestion adaptées.

I.2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

I.2.1. Eaux usées industrielles et caractéristiques des boues

Les eaux usées issues des savonneries et des raffineries se distinguent par leur composition complexe et variée, influencée par les procédés industriels utilisés et la nature des matières premières. Elles contiennent généralement une combinaison de polluants organiques et inorganiques qui nécessitent une gestion rigoureuse avant tout rejet ou réutilisation.

I.2.1.2. Vue d'ensemble des composants physico-chimiques et biologiques

Les boues générées par le traitement des eaux usées des savonneries et des raffineries présentent une composition physico-chimique riche. Les principaux composants incluent :

- Matière organique : Largement constituée de composés carbonés provenant des graisses, huiles et débris végétaux utilisés dans les savonneries.
- Nutriments : Azote (N) et phosphore (P) sont souvent présents en quantités variables, ce qui peut contribuer à la fertilité des sols en cas de réutilisation (Metcalf & Eddy, 2014).
- Matière en suspension (MES) : Particules solides qui incluent des restes de matières grasses et des sédiments industriels.
- Métaux lourds : Les raffineries contribuent principalement à la présence de métaux tels que le plomb (Pb), le zinc (Zn) et le cadmium (Cd), dont les niveaux doivent être contrôlés pour éviter les impacts environnementaux (Gómez-Romero et *al.*, 2017).

Sur le plan biologique, les boues peuvent contenir des microorganismes diversifiés :

- Microorganismes bénéfiques tels que les bactéries impliquées dans la dégradation de la matière organique.
- Pathogènes : Bactéries (*E. coli*), virus, et parasites pouvant poser des risques pour la santé humaine et animale si les boues ne sont pas correctement traitées.

I.2.1.3. Polluants typiques

Les principales sources de pollution dans ces eaux usées et boues comprennent (Tableau I) :

- Graisses, huiles et matières grasses (FOG) : Résidus des processus de production de savons et de raffinage. Ces substances, difficiles à dégrader, peuvent perturber les systèmes de traitement biologiques conventionnels (Martinez et *al.*, 2018) ;

- Composés chimiques organiques : Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ; phénols et autres composés persistants associés aux raffineries ;
- Métaux lourds : Présents à des concentrations variables, souvent en fonction des catalyseurs utilisés dans les processus de raffinage ;
- Charge organique élevée : Mesurée par des paramètres comme la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biologique en oxygène (DBO). Une DCO élevée indique une forte teneur en composés organiques.

Tableau I. Principaux composants physico-chimiques et polluants typiques des boues des savonneries et raffineries

Composant/Polluant	Source	Impact potentiel
Graisses, huiles, matières grasses (FOG)	Production de savons	Colmatage des sols et inhibition biologique
Métaux lourds (Pb, Zn, Cd)	Procédés de raffinage	Toxicité pour les plantes et les microorganismes
Matière organique	Matières premières et résidus	Amélioration possible de la structure des sols
Microorganismes pathogènes	Déchets organiques et effluents	Risques pour la santé humaine et animale

Source : Martinez et *al.*, 2018

I.2.2. Facteurs influant sur la composition des boues

I.2.2.1. Processus de production dans les savonneries et les raffineries

Les procédés industriels des savonneries et des raffineries influencent directement la qualité et la quantité des effluents produits, ainsi que la composition des boues générées après traitement.

I.2.2.1.1. Les savonneries

- Matières premières : Les huiles végétales et animales, ainsi que les graisses utilisées dans la production de savon, génèrent des résidus organiques et des graisses persistantes dans les eaux usées (Martinez et *al.*, 2018) ;

- Processus de saponification : Ce processus chimique libère des sous-produits tels que la glycérine et des matières grasses résiduelles, qui s'accumulent dans les boues ;
- Additifs chimiques : L'utilisation de colorants, de parfums et de stabilisants peut entraîner la présence de substances chimiques complexes difficiles à dégrader dans les boues.

1.2.2.1.2. Les raffineries

- Hydrocarbures et métaux lourds : Les opérations de raffinage introduisent des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des métaux lourds tels que le plomb (Pb) et le cadmium (Cd) dans les effluents (Gómez-Romero et *al.*, 2017) ;
- Catalyseurs usés : Les catalyseurs utilisés peuvent contribuer à la présence de métaux comme le vanadium et le nickel dans les boues ;
- Complexité des effluents : Les raffineries produisent des effluents riches en composés organiques et en composés soufrés, qui influencent la composition chimique des boues.

I.2.2.2. Influence des technologies de traitement des eaux usées

Le choix des technologies de traitement des eaux usées affecte considérablement les caractéristiques des boues, notamment leur contenu en nutriments, contaminants et microorganismes.

I.2.2.2.1. Le Traitement primaire

- Décantation : Le retrait des matières en suspension dans les effluents industriels génère des boues contenant principalement des sédiments solides et des résidus organiques ;
- Flottation : Utilisée pour retirer les graisses et huiles, elle conduit à des boues riches en FOG (Fat, Oil, and Grease).

I.2.2.2.2. Le Traitement secondaire

- Procédés biologiques : Les systèmes à boues activées décomposent les matières organiques mais enrichissent les boues en microorganismes vivants et morts (Metcalf & Eddy, 2014) ;
- Réacteurs anaérobies : Génèrent des boues contenant du biogaz résiduel, des acides gras volatils et des éléments nutritifs comme l'azote ammoniacal.

I.2.2.2.3. Le Traitement tertiaire

- **Filtration et désinfection** : Réduisent la charge pathogène mais peuvent enrichir les boues en produits chimiques issus des agents désinfectants comme le chlore ou l'ozone ;
- **Traitement chimique** : L'ajout de coagulants (par ex., sels de fer ou d'aluminium) pour la clarification des eaux peut augmenter la teneur en métaux dans les boues.

I.2.3. Analyse physico-chimique et microbiologique des boues

I.2.3.1 Principales propriétés physico-chimiques

I.2.3.1.1. Paramètres physico-chimiques des boues

I.2.3.1.1.1. Le pH

- **Rôle** : Le pH des boues affecte leur interaction avec le sol, notamment la disponibilité des nutriments et la mobilité des métaux lourds ;
- **Normes** : Un pH neutre à légèrement alcalin (6,5–8,5) est souvent préférable pour une utilisation agricole ;
- **Influences** : Les processus industriels et le traitement des eaux usées influencent directement le pH des boues. Par exemple, l'ajout de coagulants comme la chaux peut rendre les boues alcalines (Metcalf & Eddy, 2014).

I.2.3.1.1.2. Matière organique (MO)

- **Rôle** : La MO est une source essentielle de nutriments pour les cultures et améliore la structure du sol. Une teneur élevée en MO (>30 %) indique un potentiel élevé pour la fertilisation ;
- **Origine** : La matière organique des boues provient principalement des résidus végétaux et animaux présents dans les effluents industriels.

I.2.3.1.1.3. Teneur en éléments nutritifs

- **Azote (N)** : Sous forme organique ou ammoniacale, il est essentiel pour la croissance des plantes mais peut causer une pollution des eaux souterraines en cas de lixiviation excessive ;

- Phosphore (P) : Un élément clé pour le développement racinaire, souvent présent sous forme de phosphates ;
- Potassium (K) : Bien que souvent présent en quantités moindres, il contribue à la résistance des cultures aux stress abiotiques.

I.2.3.1.1.4. Métaux lourds

- Rôle et Risques : Les métaux lourds (par exemple, Pb, Cd, Zn, Cu) sont des contaminants majeurs. Bien que certains (comme Zn et Cu) soient des oligo-éléments pour les plantes, à des concentrations élevées, ils deviennent toxiques ;
- Sources : Les métaux lourds proviennent souvent des catalyseurs, des pigments ou des déchets industriels des raffineries et savonneries (Gómez-Romero et *al.*, 2017).

I.2.3.2 Propriétés microbiologiques

I.2.3.2.1. Microorganismes bénéfiques versus pathogènes

I.2.3.2.1.1. Microorganismes bénéfiques

- Rôles :
 - Amélioration de la fertilité du sol grâce à la décomposition de la matière organique et la libération de nutriments essentiels tels que l'azote et le phosphore (Iqbal et *al.*, 2021) ;
 - Augmentation de l'activité microbienne du sol, ce qui favorise la croissance des cultures ;
- Exemples :
 - Bactéries : *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp. (stimulent la croissance des plantes) ;
 - Fongiques : *Trichoderma* spp. (améliorent la résistance des plantes).

I.2.3.2.1.2. Microorganismes pathogènes

- Rôles:
 - Présence potentielle de pathogènes humains qui posent des risques sanitaires lors de l'utilisation des boues comme amendement.
- Exemples:
 - Bactéries: *Salmonella* spp., *Escherichia coli* pathogène;

- Virus : Virus entériques tels que les rotavirus ;
- Parasites : Œufs d'helminthes comme *Ascaris lumbricoides*

I.2.3.2.2. Risques sanitaires associés aux pathogènes

I.2.3.2.2.1. Exposition directe

- Manipulation des boues par les agriculteurs sans protection adéquate ;
- Contact des populations locales avec des sols ou des cultures contaminées.

I.2.3.2.2.2. Contamination des ressources

- Lessivage des agents pathogènes vers les nappes phréatiques ou les cours d'eau ;
- Transfert de pathogènes via les cultures aux consommateurs.

I.2.3.2.2.3. Bioaérosols

- Diffusion d'aérosols microbiens lors de l'épandage des boues, exposant les populations avoisinantes (Sahlström, 2003).

I.2.3.3. Techniques d'hygiénisation

Pour minimiser les risques sanitaires, différentes techniques d'hygiénisation sont appliquées aux boues afin de réduire la charge pathogène (tableau II).

Tableau II. Techniques d'hygiénisation appliquées aux boues afin de réduire la charge pathogène

Technique	Principe	Efficacité
Traitement thermique	Chauffage des boues à des températures élevées (70-100 °C).	Élimination efficace des bactéries et virus.
Compostage	Fermentation aérobie des boues avec des matières organiques.	Réduction des pathogènes et amélioration de la qualité organique.
Stabilisation alcaline	Ajout de chaux pour augmenter le pH (>12), inhibant la croissance des pathogènes.	Bonne élimination des œufs d'helminthes.
Digestion anaérobie	Dégradation des matières organiques dans des conditions sans oxygène.	Réduction modérée des pathogènes.

Source : Sahlström, 2003

I.2.4. Risques environnementaux et agronomiques liés à l'utilisation des boues

I.2.4.1 Préoccupations environnementales

I.2.4.1.1. Contamination des sols et accumulation de métaux lourds

Les boues peuvent contenir des concentrations élevées de métaux lourds tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le zinc (Zn) et le cuivre (Cu). Ces métaux proviennent souvent des procédés industriels et peuvent s'accumuler dans les sols lorsque les boues sont utilisées comme amendement. Cette accumulation progressive peut entraîner une toxicité pour les plantes, perturber la biodiversité du sol et potentiellement affecter la chaîne alimentaire (Gómez-Romero et *al.*, 2017). En effet, des concentrations élevées de métaux lourds peuvent inhiber la croissance des plantes et rendre les cultures impropres à la consommation humaine ou animale.

De plus, la biodisponibilité de ces métaux dépend de plusieurs facteurs, tels que le pH du sol, la matière organique et les propriétés de rétention des sols. Des sols acides, par exemple, peuvent faciliter la lixiviation des métaux lourds, augmentant ainsi leur mobilité dans l'environnement (Ghosh et Singh, 2005).

I.2.4.1.2. Impact sur les eaux superficielles par lixiviation ou ruissellement

La lixiviation et le ruissellement sont des mécanismes importants par lesquels les métaux lourds et autres contaminants présents dans les boues peuvent migrer vers les eaux superficielles. Lorsque les boues sont appliquées sur le sol, des phénomènes de lessivage peuvent se produire, surtout en période de pluie. Cela peut entraîner la contamination des nappes phréatiques et des cours d'eau voisins, affectant la qualité de l'eau et potentiellement représentant un danger pour la santé humaine et l'écosystème aquatique (Zhang et *al.*, 2013). En outre, la capacité des boues à retenir les éléments toxiques dépend de leur teneur en matière organique et de leur structure physique, ce qui peut varier considérablement selon les procédés de traitement appliqués. Les boues mal stabilisées sont particulièrement sujettes à la lixiviation des éléments chimiques, augmentant ainsi les risques de pollution des eaux superficielles.

I.2.4.2 Défis agronomiques

I.2.4.2.1. Risques de transfert de pathogènes vers les cultures

Les boues peuvent contenir des agents pathogènes tels que des bactéries (*Salmonella spp.*, *Escherichia coli*), des virus (rotavirus), et des parasites (*Ascaris lumbricoides*), qui peuvent représenter un risque pour les cultures et, par conséquent, pour les consommateurs. Lorsqu'elles sont appliquées sur les sols agricoles, ces boues peuvent introduire ces agents pathogènes dans l'environnement, avec un potentiel de contamination des cultures. Les pathogènes peuvent se transférer directement vers les plantes par contact racinaire ou indirectement par irrigation, surtout en l'absence de traitement préalable des boues pour éliminer ces microorganismes (Sahlström, 2003). Pour limiter ce risque, des pratiques d'hygiénisation, telles que le compostage ou l'ajout de chaux, peuvent être utilisées avant l'application des boues sur les terres agricoles. Ces méthodes permettent de réduire significativement la charge pathogène et de rendre les boues plus sûres à utiliser comme amendement (Ferguson et *al.*, 2018).

I.2.4.2.2. Équilibre entre disponibilité des nutriments et toxicité

Bien que les boues puissent fournir des nutriments essentiels aux plantes, tels que l'azote, le phosphore et le potassium, leur utilisation présente également des défis liés à l'équilibre entre la disponibilité des nutriments et leur toxicité (Tableau III). Les niveaux élevés de certains éléments nutritifs, comme l'azote, peuvent entraîner une fertilisation

excessive, conduisant à une eutrophisation des sols et à des problèmes de contamination des eaux souterraines ou superficielles par le nitrate. En revanche, la présence de métaux lourds ou d'autres contaminants peut affecter la croissance des plantes et compromettre la qualité des cultures. Il est donc crucial d'évaluer soigneusement la composition des boues avant leur application afin de garantir un apport adéquat en nutriments tout en évitant des concentrations toxiques pour les sols et les plantes. Des tests réguliers de la teneur en nutriments et en contaminants sont nécessaires pour ajuster les pratiques agricoles et assurer la sécurité des cultures (Zhang et *al.*, 2014).

Tableau III. Risques Environnementaux et Agronomiques Associés à l'Utilisation des Boues

Type de risqué	Description	Exemples de composants
Contamination des sols	Accumulation de métaux lourds et autres contaminants dans le sol.	Pb, Cd, Zn, Cu, hydrocarbures
Impact sur les eaux superficielles	Lixiviation ou ruissellement des contaminants vers les eaux de surface.	Métaux lourds, nutriments en excès
Transfert de pathogènes	Risque de contamination des cultures par des agents pathogènes présents dans les boues.	Salmonella spp., E. coli, Ascaris
Équilibre des nutriments et toxicité	Excès de nutriments ou présence de métaux lourds rendant les cultures impropres.	Azote, phosphore, métaux lourds

Source: Zhang et *al.*, 2014

I.2.5. Applications agricoles des boues industrielles

I.2.5.1. Avantages de l'utilisation des boues comme engrais

I.2.5.1.1. Amélioration de la fertilité et de la structure des sols

L'application des boues comme engrais présente plusieurs avantages agronomiques. Elles constituent une source importante de nutriments essentiels tels que l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), et d'autres micronutriments nécessaires à la croissance des plantes. Ces nutriments sont souvent déficitaires dans les sols cultivés de manière intensive, et l'apport de boues permet de les réintroduire de manière naturelle. De plus, les boues améliorent la structure du sol en augmentant sa teneur en matière organique, ce qui favorise la rétention d'eau et la stabilité du sol. Cela permet d'augmenter la capacité de rétention en eau

des sols sableux et de favoriser le drainage dans les sols argileux, contribuant ainsi à une meilleure structure du sol (Sims et *al.*, 2002).

L'augmentation de la matière organique contenue dans les boues permet également d'améliorer l'activité microbienne du sol, ce qui est crucial pour la dégradation de la matière organique et l'amélioration des cycles des éléments nutritifs dans le sol (Chadwick et *al.*, 2009). Cette amélioration de la structure du sol contribue à une meilleure aération et réduit la compaction des sols, ce qui favorise la croissance des racines et donc la productivité des cultures.

I.2.5.1.2. Contribution à une gestion durable des déchets

L'utilisation des boues comme amendement agricole s'inscrit dans une démarche de gestion durable des déchets. Elle permet de recycler une ressource qui, sans valorisation, serait souvent rejetée dans des sites d'enfouissement ou des incinérateurs, contribuant ainsi à la réduction des volumes de déchets industriels. En utilisant les boues pour fertiliser les terres agricoles, les risques environnementaux liés à leur élimination sont réduits, et les producteurs agricoles bénéficient d'un approvisionnement en fertilisants à faible coût (Pandey et *al.*, 2015). Ce processus contribue également à la réduction de la dépendance aux engrais chimiques, qui ont un coût élevé et un impact environnemental notable.

I.2.5.2 Études de cas sur l'utilisation des biosolides

I.2.5.2.1. Exemples d'applications réussies dans des contextes similaires

Plusieurs études de cas ont démontré les avantages de l'utilisation des boues industrielles dans l'agriculture. Par exemple, une étude menée aux États-Unis a montré que l'utilisation de biosolides pour fertiliser les cultures de maïs et de soja a conduit à une augmentation significative de la productivité agricole tout en maintenant la qualité du sol. Les boues appliquées sur les sols ont permis de fournir des nutriments essentiels tout en améliorant la structure du sol, ce qui a conduit à des rendements plus élevés et plus durables dans le temps (Harrison et *al.*, 2012). En Europe, une étude menée en France a utilisé des boues de raffinerie traitées pour améliorer les sols des exploitations maraîchères. Les résultats ont montré non seulement une meilleure disponibilité des nutriments, mais également une réduction des coûts d'irrigation en raison de la meilleure rétention d'eau dans les sols traités (Barbosa et *al.*, 2016). Ces exemples soulignent l'efficacité des boues industrielles comme

amendement dans différents contextes agricoles et la pertinence de ces pratiques dans la gestion durable des sols.

I.2.5.2.2. Leçons apprises et bonnes pratiques

Des études de cas ont également mis en évidence certaines bonnes pratiques et leçons importantes pour maximiser les bénéfices des boues en agriculture tout en minimisant les risques environnementaux. Une des principales recommandations est la nécessité de stabiliser les boues avant leur application, par des procédés tels que le compostage ou le séchage. Cela permet de réduire la présence de pathogènes et d'améliorer la biodisponibilité des nutriments. De plus, il est important de procéder à des analyses régulières de la composition des boues pour s'assurer qu'elles respectent les normes de sécurité, notamment en ce qui concerne les niveaux de métaux lourds et de contaminants organiques. Les pratiques de gestion doivent inclure des tests sur les sols et les cultures afin de vérifier les effets à long terme de l'utilisation des boues, et pour ajuster les quantités appliquées en fonction des besoins spécifiques des sols (Ferguson et *al.*, 2018). Les leçons tirées des études de cas suggèrent également qu'il est essentiel de respecter les réglementations locales concernant l'utilisation des boues dans l'agriculture, ainsi que d'adopter une approche intégrée impliquant les parties prenantes locales, y compris les agriculteurs, les autorités environnementales et les chercheurs, pour assurer la durabilité des pratiques.

I.2.6. Zones agroécologiques au cameroun

Le Cameroun est divisé en cinq principales zones agroécologiques, chacune caractérisée par des conditions climatiques, des types de sol, et des pratiques agricoles distinctes. Ces zones reflètent une grande diversité environnementale et agricole, offrant des opportunités pour diverses cultures et systèmes de production.

I.2.6.1. Zone de la savane soudano-sahélienne

Située dans le nord du Cameroun, cette zone se caractérise par un climat sec avec une pluviométrie annuelle variant de 400 à 900 mm, concentrée sur une courte saison des pluies. Les sols, souvent ferrugineux, soutiennent des cultures résistantes à la sécheresse telles que le mil, le sorgho, et l'arachide. Cependant, cette zone est confrontée à une dégradation rapide des terres due à la désertification et à la pression démographique (FAO, 2023).

I.2.6.2. Zone de la savane soudano-guinéenne

Elle couvre une partie du centre et du nord-ouest du pays. Avec une pluviométrie annuelle de 900 à 1500 mm, cette région est favorable aux cultures telles que le maïs, le coton et les légumineuses. Les sols fertiles permettent aussi l'élevage extensif, bien que des défis liés à l'érosion et à la gestion des ressources en eau persistent (IRAD, 2022).

I.2.6.3. Zone de forêt tropicale humide

Localisée dans le sud et le sud-est, cette zone reçoit des précipitations abondantes allant jusqu'à 2000 mm par an. Elle est propice aux cultures de rente comme le cacao, le café, et l'huile de palme, ainsi qu'aux cultures vivrières telles que le manioc et la banane plantain. Cependant, l'exploitation forestière non durable et la déforestation posent des menaces écologiques importantes (GESCOD, 2021).

I.2.6.4. Zone des hautes terres de l'ouest

Ce territoire montagneux bénéficie d'un climat tempéré avec des précipitations oscillant entre 1500 et 2000 mm. Les sols volcaniques riches favorisent les cultures telles que le maïs, le haricot, et les pommes de terre, ainsi que l'horticulture. L'érosion des sols est toutefois un problème majeur, nécessitant des techniques de conservation comme les terrasses et le reboisement (FAO, 2023).

I.2.6.5. Zone côtière

Cette région est influencée par un climat équatorial avec des précipitations atteignant 4000 mm par an. Les sols alluviaux et volcaniques sont particulièrement adaptés à la production de cultures telles que les bananes, l'hévéa, et le poivre. Toutefois, la salinisation des sols dans les zones de mangrove est une contrainte importante (IRAD, 2022).

Ces zones sont définies à l'aide de données climatiques, pédologiques et biologiques, en utilisant des méthodologies de zonage agroécologique élaborées par des institutions telles que la FAO. Les conditions de production y sont étroitement liées aux régimes pluviométriques et à la capacité des sols à retenir l'humidité, influençant ainsi les pratiques agricoles et la durabilité environnementale (FAO, 2023 ; IRAD, 2022).

I.2.7. Cadres réglementaires et politiques

I.2.7.1 Normes pour la réutilisation des boues en agriculture

I.2.7.1.1. Directives internationales et régionales

Au niveau international, plusieurs organisations telles que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et la Banque mondiale ont établi des directives qui régissent l'utilisation des boues industrielles comme amendement agricole. Ces directives sont axées sur deux grands principes : la réduction des risques sanitaires (notamment les pathogènes) et la protection des sols et des eaux contre la contamination par des métaux lourds et d'autres contaminants. L'OMS, par exemple, recommande des normes strictes pour les boues destinées à la réutilisation, stipulant des limites précises pour des éléments tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le mercure (Hg), et le cuivre (Cu), afin de prévenir leur accumulation dans les sols et d'éviter la contamination des cultures (World Health Organization, 2006). Ces limites sont établies pour garantir que les métaux lourds ne dépassent pas des concentrations dangereuses qui pourraient nuire à la santé humaine et à l'environnement. Dans le cadre régional, les pays africains, dont le Cameroun, suivent en grande partie ces normes internationales, bien que des ajustements locaux puissent être faits en fonction des réalités nationales. Au Cameroun, la gestion des boues industrielles et leur réutilisation en agriculture sont encadrées par des régulations émises par le Ministère de l'Environnement, de la Protection de la Nature et du Développement Durable (MINEPDED), ainsi que par le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MINADER). Ces régulations incluent des normes relatives à la gestion des risques, à la surveillance de la qualité des boues et des sols, ainsi qu'à la protection des ressources en eau (MINEPDED, 2013).

I.2.7.1.2. Conformité avec les réglementations locales au Cameroun

Au Cameroun, bien que des normes générales existent, l'application et le respect de ces régulations restent problématiques dans de nombreuses régions. La mise en œuvre des normes relatives à la réutilisation des boues industrielles en agriculture est entravée par des facteurs tels que le manque de capacité technique et financière pour réaliser des analyses régulières des boues et des sols, ainsi que des lacunes dans la sensibilisation des agriculteurs aux risques potentiels. De plus, il existe des disparités régionales dans l'application de ces règles, ce qui peut entraîner des pratiques inappropriées dans certaines zones rurales où l'accès à l'information et aux infrastructures de traitement des boues est limité.

I.2.7.2 Défis dans la mise en œuvre

I.2.7.2.1. Écarts entre la politique et la pratique

Un des défis majeurs dans la réutilisation des boues industrielles en agriculture est l'écart entre les politiques et leur mise en œuvre effective. Bien que le cadre législatif et réglementaire soit souvent adéquat sur le papier, il existe des difficultés considérables dans l'application sur le terrain. Cela est dû à des facteurs tels que l'insuffisance des contrôles, l'absence de mécanismes de suivi et de régulation efficaces, ainsi que la gestion inadéquate des déchets industriels dans de nombreuses entreprises (Oyeku et *al.*, 2014). Par exemple, bien que des limites légales existent concernant la concentration en métaux lourds dans les boues, ces limites ne sont pas toujours respectées lors de leur collecte et de leur traitement, ce qui pose des risques pour la qualité du sol et la santé publique.

I.2.7.2.2. Implication des parties prenantes et besoins en renforcement des capacités

Un autre défi réside dans le manque d'implication des parties prenantes locales dans le processus de réutilisation des boues industrielles. Le succès de la mise en œuvre de ces réglementations nécessite une collaboration étroite entre les autorités locales, les producteurs agricoles, les entreprises industrielles et les experts en environnement. Cependant, cette collaboration est souvent limitée en raison du manque de sensibilisation et de formation des parties prenantes concernant les avantages et les risques de l'utilisation des boues comme amendement agricole.

Par conséquent, il existe un besoin urgent de renforcer les capacités techniques des acteurs locaux, en particulier des agriculteurs et des gestionnaires des boues. Cela pourrait se traduire par la mise en place de programmes de formation sur les pratiques sécuritaires d'utilisation des boues, l'importance de la surveillance de la qualité des sols et des cultures, ainsi que des sessions de sensibilisation sur les impacts environnementaux et sanitaires potentiels (MINEPDED, 2018). Un autre aspect crucial est la nécessité d'une meilleure gestion des déchets industriels et d'un suivi plus rigoureux pour s'assurer que les normes de sécurité sont respectées à chaque étape du processus.

I.2.8. Présentation de la structure d'accueil

Le Partenaire Financier avec Christ (PAFIC) est une industrie privée Camerounaise située à OKOLA plus précisément à la descente carrière Leboudi (fig.1). C'est une entreprise citoyenne spécialisée dans la production et la commercialisation des savons de ménage et de

toilette, laits de toilette, glycérine, des films plastique, des bouteilles plastiques, l'huile raffinée, l'eau minérale, des boissons énergisantes, du beurre de table et dans un futur proche du chocolat.

I.2.8.1. Historique

Placée sous la tutelle du ministère des mines et du développement technologique (MINMIDT) elle a été inaugurée le 14 janvier 2016 par le gouverneur de la région du centre. Le 18 Août 2019, elle lance la production de films plastiques. Ses produits sont distribués depuis les premiers jours au Cameroun à 10-20% et dans la sous-région (Tchad, RCA, etc.) à plus de 80%. Elle débute ses activités avec un capital de 5 000 000 de franc CFA.

I.2.8.2. Objectifs

PAFIC SARL a pour but de contribuer au développement du Cameroun et de la sous-région CEMAC. Elle ambitionne de devenir à moyen terme la principale savonnerie-raffinerie du Cameroun. Pour ce faire, elle s'est définie les missions suivantes :

- Réduire l'inégalité entre la demande et l'offre sur le marché sous régional en savon et huile comestible ;
- Réduire les importations des produits de premières nécessités ;

I.2.8.3. Situation géographique

La société PAFIC est située vers Okola (à Leboudi) plus précisément à la descente carrière. Son plan de localisation est donné par la figure ci-après



Fig. 1. Situation géographique de pafic sarl (google earth)

I.2.8.4. Fiche signalétique

L'entreprise PAFIC SARL dispose d'une organisation fonctionnelle. L'ensemble des éléments d'identification de la structure sont donnés par le tableau IV.

Tableau IV. Fiche signalétique de la structure

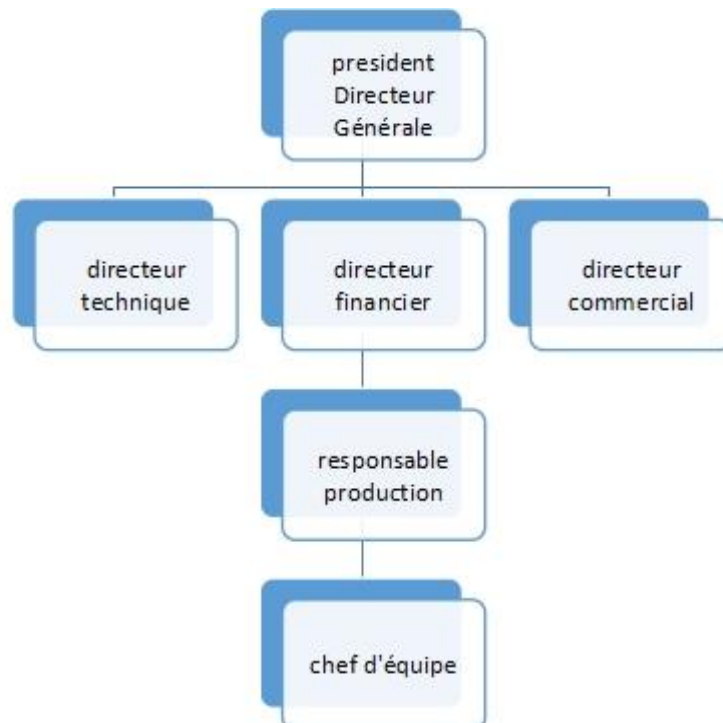
Raison sociale	Partenaire Financier avec Christ
Sigle	PAFIC
Logo	
Forme juridique	Société à responsabilité limitée (SARL)
Registre de commerce et du crédit mobilier	RC/YAO/2013/B/441
N° de contribuable	MO51300048858S
Siège social	Okola
Année de création	2014
Président Directeur Général	M.TCHOFFO Bertin
Secteur d'activité	Secondaire
Type de société	Agro-alimentaire
Activité	Fabrication et commercialisation des savons, des produits cosmétiques (laits de toilette, glycérine,..) et des boissons
Capital	1 546 904 798 FCFA
Boîte postale	13 Okola
e-mail	Pafic.sarl@yahoo.fr / sale@pafic-sarl.com
Site web	www.pafic-sarl.com
Téléphone	(+237) 222 22 15 14
Fax	(+237) 222 22 15 19
Effectif au 01 MAI 2023	256 employés

Source : documentation de PAFIC SARL

I.2.8.5. Structure et fonctionnement de l'entreprise

La création de toute activité commerciale ou industrielle nécessite la mise sur pied des organes de direction et de gestion efficient. Ceux-ci sont basés sur une définition des tâches cohérentes pour un bon fonctionnement de l'entreprise. Le département de production de boissons dans lequel nous avons effectué notre stage est subdivisé comme présenté dans la figure 2.

- La direction d'exploitation responsable de la production
- Le service de production chargé de superviser tous les travaux au niveau des unités de production
- Le service d'entretien et de maintenance chargé d'assurer l'entretien, la maintenance, le réglage des machines au niveau de l'unité de production, et de gérer le magasin des pièces de rechange
- Le laboratoire : s'occupe de la composition des produits chimiques pour la transformation des matières premières, du contrôle qualité des produits finis, de la commande et de la gestion des produits chimiques
- Le magasin : c'est un local aménagé servant à entreposer les matières premières et les produits finis destinés à la vente.



Source : documentation de PAFIC Sarl

Fig. 2. Structure de l'entreprise

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

II.1. Localisation du site d'étude

La société PAFIC est située vers Okola (à Leboudi) plus précisément à la descente carrière (fig.3). Elle est une société à responsabilité limitée spécialisée dans la production de savon, de produits cosmétiques, et le raffinage d'huile. La station de traitement des eaux se trouve à l'extérieur de l'entreprise à l'extrême droite. Les coordonnées géographiques du site sont : Latitude : 3.9093125, Longitude : 11.4456609.

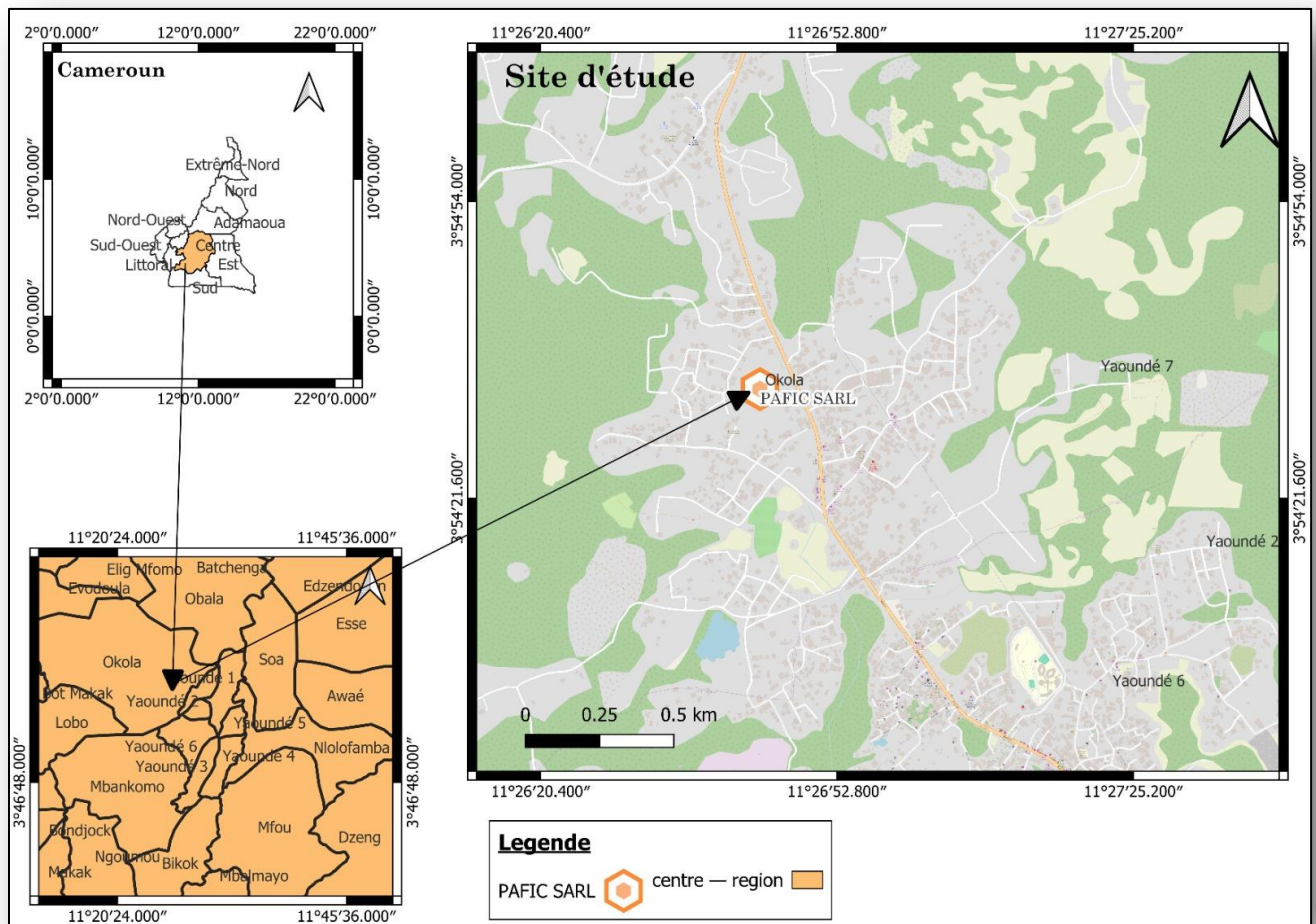


Fig. 3. Site d'étude

source : Arcgis

II.2. Matériel utilisé

Pour une collecte efficiente des données sur le terrain, l'étude a nécessité la mobilisation d'un certain nombre de ressources (Tableau V).

Tableau V. Matériel utilisé

Catégories	Noms	Utilité
Recherches documentaires en ligne	Moteurs de recherche : Google, Wikipédia, Academia	Collecte des données et revue de la littérature
	Sites Internet : PAFIC ; Reseachgate.net	Collecte des données et revue de la littérature
Recherche documentaire physique	Fiches d'enquête ;	Collecte des données sur le terrain
	Mémoires et thèse disponibles au département de BOV /BPV	Collecte des données et revue de la littérature
Logiciels	Microsoft Word 2013	Rédaction du mémoire
	Microsoft Excel 2013	Ressortir les tableaux des résultats d'analyse
	Google Earth	Etablir les cartes
Outils	Blocs notes, stylo, crayon.	Prise de notes
	Clé USB	Pour sauvegarder les fichiers et les données numériques qui ont été collectés
	Ordinateur de marque DELL	Pour la saisie de notre travail
Outils	Appareil photo	Prise de quelques images
	Le modem wifi fibre optique Camtel	Pour la connexion internet
	Un GPS	Pour la prise des coordonnées Géographique
E P I Equipement de protection individuelle	- Bottes en caoutchouc - Gang en caoutchouc - Casques - Masque respiratoire - Chasuble	Ces équipements nous ont permis d'être identifiable et éviter les risques d'accidents et de maladies professionnels liés au site

Source : notre élaboration.

II.3. Méthodes

II.3.1. Évaluation des pratiques actuelles de gestion des eaux usées et des boues à PAFIC SARL

L'évaluation des pratiques actuelles de gestion des eaux usées et des boues à PAFIC SARL a été réalisée à travers une combinaison de techniques de collecte de données qualitatives et quantitatives. Cette étude repose sur l'analyse des pratiques de gestion existantes, l'examen des infrastructures de traitement, et l'évaluation des impacts environnementaux associés à la gestion des boues. Les étapes suivantes détaillent les méthodes utilisées.

Dans un premier temps, une revue documentaire a été effectuée afin de comprendre les pratiques internes de l'entreprise. Cette analyse a inclus l'examen des rapports environnementaux, des politiques internes, et des procédures de gestion des eaux usées et des boues. Les documents obtenus ont permis d'identifier les processus en place pour le traitement des eaux usées, le type de boues générées, ainsi que les stratégies de gestion des déchets. Cette étape a aussi permis de définir les normes et réglementations en matière de gestion des boues au sein de PAFIC SARL, en relation avec les exigences nationales et internationales (MINEPDED, 2013). Des entretiens semi-structurés ont ensuite été réalisés avec des responsables des départements technique et environnemental de l'entreprise. Ces entretiens ont servi à recueillir des informations détaillées sur les techniques de traitement appliquées aux eaux usées, ainsi que sur la gestion des boues. Les discussions ont permis de mieux comprendre les défis opérationnels liés au stockage et à l'élimination des boues, notamment en termes de capacité des installations, de coûts, et de conformité avec les réglementations locales. Les informations collectées ont permis de cerner les pratiques courantes de gestion des boues et d'identifier les éventuelles lacunes ou domaines nécessitant des améliorations. En complément, une observation directe des installations de traitement des eaux usées a été effectuée. Cette visite sur site a permis d'observer les processus de collecte, de traitement et de stockage des boues.

II.3.2. Analyse des caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des boues issues du traitement des eaux usées

II.3.2.1. Collecte des échantillons

Les échantillons de boues ont été prélevés directement à la sortie du système de traitement des eaux usées de PAFIC SARL (fig.4), afin de représenter les boues générées

après traitement. Plusieurs échantillons ont été collectés à différents moments pour refléter la diversité des boues produites. Ces échantillons ont ensuite été mélangés pour former un échantillon composite, garantissant ainsi une représentation homogène des boues traitées. Les échantillons ont été recueillis dans des bouteilles de prélèvement préalablement nettoyées et stérilisées. Afin de préserver les caractéristiques des boues et éviter toute altération, les échantillons ont été transportés au laboratoire de biologie et physiologie végétale de l'Université de Yaoundé I dans un délai de 24 heures.



Fig. 4. Collecte de l'échantillon de biosolide

II.3.2.2. Analyse physico-chimique

II.3.2.2.1. Mesure du pH

Les mesures du pH ont été effectuées en plongeant l'électrode en verre dans environ 100 ml d'échantillon. Cette détermination s'est faite après calibrage préalable du pH-mètre à l'aide des solutions tampons de valeurs 7,00 et 4,01. Les valeurs de pH ont été lues sur l'écran à affichage digital du pH-mètre de marque *Exact* utilisé.

II.3.2.2.2. Mesure de la conductivité, de la salinité, des solides totaux dissous et de la température

Les mesures de la conductivité électrique (Cnd) de l'eau, qui est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm, ont été effectuées en se servant d'un conductimètre de marque *Exact*. Cet appareil est muni d'une sonde standard qui est plongée verticalement dans la solution dont on souhaite déterminer la concentration. La valeur de la conductivité est lue sur un écran à affichage digital.

II.3.2.2.3. Minéralisation

La minéralisation des échantillons s'est faite comme suit : à 0,2 g de boues et de plantes ont été ajouté, dans les cellules de minéralisation, 4 ml d'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré à 95 %. Ces solutions ont été ensuite incubées pendant environ 5 minutes au minéralisateur digesdahl de marque Hach, d'abord à basse température, puis par augmentation progressive de température à 440 °C jusqu'à l'éclaircissement du mélange. Durant l'incubation, plus précisément entre la 3^{ème} et la 4^{ème} minute (après ébullition) ont été ajoutés progressivement, goutte à goutte, 10 ml de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) à l'aide d'une seringue. Les minéralisât ainsi obtenus (4-5 ml) sont ramenés à 70 ml dans une fiole jaugée avec de l'eau distillée.

II.3.2.2.4. Dosage de l'azote total

La détermination de l'azote total dans les boues à l'aide de la méthode HACH repose sur une série d'étapes comprenant la digestion, la réduction et la mesure colorimétrique. Après avoir prélevé et préparé les échantillons, ceux-ci sont d'abord digérés avec un réactif spécial, généralement un mélange de soufre et de peroxyde de potassium, pour convertir l'azote organique en azote minéral (principalement sous forme de nitrate). Ensuite, un réactif réducteur est ajouté pour transformer l'azote en ion ammonium. La concentration d'azote est mesurée par spectrophotométrie, après ajout d'un réactif de HACH qui génère une couleur spécifique en réaction avec l'ammonium. L'intensité de la couleur, mesurée à 420 nm, est proportionnelle à la concentration d'azote dans l'échantillon. La lecture se fait au spectrophotomètre DR/3900 de marque Hach à la longueur d'onde 550 nm Les valeurs sont affichées et exprimées en mg/l

II.3.2.2.5. Dosage du phosphore

La teneur en phosphore total a été déterminée par la méthode dite du «molybdovanadate» (Anonyme, 2005). 1 ml du réactif molybdovanadate est ajouté à 25 ml de chaque échantillon préalablement minéralisé. Un témoin constitué d'eau distillée suit le même traitement. Si les molécules d'orthophosphates sont présentes, elles vont réagir avec le molybdate dans un milieu acide pour former le complexe phosphomolybdate. En présence de vanadium, l'acide vanadomolybdophosphorique qui a une couleur jaune se forme. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration des phosphates présents dans le milieu. La lecture se fait au spectrophotomètre DR/3900 de marque Hach à la longueur d'onde 650 nm. Les valeurs sont affichées sous forme d'orthophosphate (PO_4^{3-}) et exprimées en mg/l. La

conversion de cet orthophosphate en phosphore est obtenue en divisant le résultat obtenu par 3,07.

II.3.2.2.6. Dosage du potassium

L'ion potassium se combine au tétraphénylborate de sodium pour former un précipité blanc de tétraphénylborate de potassium (Anonyme, 2005). La concentration du potassium est proportionnelle à la turbidité produite. A 25 ml d'échantillon contenu dans une éprouvette, ajouter successivement les contenus d'une gélule de réactif potassium 1 et potassium 2. Boucher et retourner plusieurs fois pour mélanger. Dès que la solution est limpide, ajouter le contenu d'une gélule de réactif potassium 3. Agiter pendant 30 secondes et verser la solution obtenue dans une cellule de 25 ml. Remplir une autre cuvette (le blanc) avec 25 ml d'échantillon. La lecture se fait au spectrophotomètre DR/3900 à la longueur d'onde 650 nm. Le résultat est exprimé en mg/l de potassium.

II.3.2.2.7. Dosage du cadmium

La teneur en cadmium a été déterminée par la méthode de dithizone (Anonyme, 2005). En effet, le réactif dithiVer forme avec le cadmium un complexe rose-rouge de dithizonate qui est extrait du chloroforme. A 250 ml d'échantillon contenu dans une ampoule à décanter, l'on ajoute le contenu d'une solution tampon de citrate pour métaux lourds puis on agite pour dissoudre. On ajoute 30 ml de chloroforme dans le mélange obtenu. L'ampoule à décanter est inversée plusieurs fois pour homogénéisation et on obtient une solution de dithizone. A cette dernière, on ajoute 20 ml de soude à 50 % puis à l'aide d'une spatule on y ajoute 0,1 g de cyanure de potassium et on agite énergiquement pendant une minute. Un coton est inséré à la sortie de l'ampoule à décanter et à l'aide du robinet, la partie inférieure de la solution est libérée dans une cellule spectrophotométrique de 25 ml. L'intensité de la coloration est mesurée en utilisant le spectrophotomètre DR/3900 à la longueur d'onde 515 nm avec le chloroforme dans la solution. Le blanc est obtenu en prenant 25 ml de chloroforme qu'on introduit dans une cellule de 25 ml.

II.3.2.2.8. Dosage du chrome

Le chrome hexavalent a été déterminé par la méthode 1,5-diphénylcarbo-hydrazide (Anonyme, 2005) en utilisant une formulation de réactif en poudre unique appelé ChromaVer 3. Ce réactif contient un tampon avec le diphénylcarbazine, qui réagit pour donner une coloration violette en présence de chrome hexavalent. La méthode est la suivante : remplir une cuvette colorimétrique avec 10 ml d'échantillon, ajouter le contenu d'une gélule de réactif

ChromaVer 3. Dans une autre cuvette colorimétrique de 10 ml, ajouter 10 ml d'eau distillée (le blanc). Après 5 minutes de réaction de l'échantillon, l'intensité de la coloration est mesurée en utilisant le spectrophotomètre de marque DR/3900 à la longueur d'onde 540 nm. Cette valeur s'exprime en mg/l de chrome hexavalent.

II.3.2.2.9. Dosage du fer

La teneur en fer a été déterminée par la méthode TPTZ. Le réactif TPTZ forme une coloration intense bleue-violet avec le fer ferreux. L'indicateur est combiné à un agent réducteur qui convertit le fer précipité ou en suspension, tel que la rouille en fer ferreux. La quantité de fer ferrique présent peut être déterminée par différence entre le résultat d'une analyse du fer ferreux et la concentration du fer total. Dans deux éprouvettes graduées de 10 ml, on ajoute 10 ml d'échantillon et 10 ml d'eau distillée, puis ajouté le contenu d'une gélule de réactif TPTZ dans chaque éprouvette et agiter pendant 30 secondes. Après 3 minutes de réaction, l'échantillon préparé et le blanc sont transférés dans deux cuvettes colorimétriques de 10 ml. L'intensité de la coloration est mesurée en utilisant le spectrophotomètre DR/3900 à la longueur d'onde 590 nm. Cette valeur s'exprime en mg/l de fer.

II.3.2.2.10. Dosage du plomb

La méthode d'analyse du plomb est celle du dithizone (Anonyme, 2005). Le principe est le suivant : les ions plomb (Pb^{2+}) en solution basique réagissent avec le dithizone pour former un complexe rouge de dithizonate de Pb extrait avec du chloroforme. A 250 ml d'échantillon contenu dans une ampoule à décanter, on ajoute le contenu d'une solution tampon de citrate pour métaux lourds, puis 30 ml de la solution de dithizone. L'ampoule à décanter est inversée puis ouverte pour permettre le contact avec l'air. 5 ml de soude 5 N sont ajoutées au mélange et l'ampoule à décanter est inversée et ouverte chaque fois après agitation. L'ajout des gouttes de soude se fait continuellement et la solution est homogénéisée jusqu'à virage de la coloration du bleu-vert à orange. A l'aide d'une spatule, on prélève 1 g de poudre de cyanure de potassium qu'on ajoute dans l'ampoule à décanter. Cette dernière est fermée et agitée de façon vigoureuse jusqu'à disparition de la couleur orangée. Un coton blanc est inséré à la sortie de chaque ampoule à décanter et la solution est libérée dans les cellules spectrophotométriques de 25 ml. L'intensité de la coloration est mesurée en utilisant le spectrophotomètre DR/3900 à la longueur d'onde 515 nm avec le chloroforme dans la réaction. Cette valeur s'exprime en mg/l de plomb.

II.3.2.2.11. Dosage du zinc

La méthode d'analyse est celle du ZincoVer (Anonyme, 2005). Le principe est le suivant : Le zinc est complexé dans l'échantillon par le cyanure. L'ajout du cyclohexanone provoque une libération sélective de zinc. Le zinc réagit ensuite avec le benzenecarboxy-2'-hydroxy-5'-sulfoformazyl (Zincon) qui est l'indicateur. La concentration en zinc est proportionnelle à la coloration bleue. Cinquante (50) ml d'échantillon sont prélevés auquel on ajoute le contenu d'un sachet de réactif de ZincoVer. On agite pour dissoudre complètement le réactif puis on introduit 25 ml de cet échantillon dans une cellule spectrophotométrique de 25 ml pour faire le blanc. On ajoute 1 ml de cyclohexanone à la solution restante. L'intensité de la coloration est mesurée en utilisant le spectrophotomètre DR/3900 à la longueur d'onde 620 nm. Cette valeur obtenue est exprimée en mg/l de zinc.

II.3.2.3. Analyse microbiologique

Deux organismes indicateurs de la pollution fécale ont été retenus. Il s'agit des Coliformes Fécaux (CF) et des Streptocoques Fécaux (SF). La présence de ces bio-indicateurs traduit une forte probabilité de présence de germes pathogènes tels que *Salmonella* sp., *Sighella* sp., *Vibrio cholerae*,... (Mara, 1976 ; Rodier, 1978). Ces germes ont été retenus puisqu'ils répondent à la majeure partie des critères reconnus chez les organismes indicateurs de la pollution fécale, à savoir :

- une indication de la présence possible de germes pathogènes ;
- une apparition en nombre plus élevé dans la nature que les germes pathogènes ;
- une plus grande résistance aux stress environnementaux ;
- une plus longue persistance que les germes pathogènes ;
- une prolifération non anarchique dans la nature ;
- une production de réactions simples et caractéristiques permettant leur identification et leur énumération sans difficulté.

Ces paramètres ont été déterminés par la technique de filtration sur membrane et dénombrés conformément au protocole standard décrit par Rodier (2009). Les milieux de culture utilisés ont respectivement été le milieu BEA pour les SF et le milieu TTC et Tergitol 7 pour les CF.

Après dilution décimales des échantillons d'eaux usées à l'aide de l'eau de dilution stérile, les échantillons ont été filtrés sur membrane de nitrocellulose à l'aide d'une pompe à vide, puis les membranes de filtration ont été placées dans les milieux de cultures respectifs. Ces milieux ont ensuite été placés dans des incubateurs à 35 °C pour les SF et à 44,5 °C pour

les CF pendant 24 heures. Après incubation, les colonies jaunes et rouges-rose marquant respectivement la présence des CF et des SF ont été dénombrées et leurs charges totales dans l'effluent ont été estimées par la formule ci-dessous:

$$\text{UFC} = \frac{\text{Nombre de colonies comptées}}{\text{Volume d'échantillon filtré (mL)}} \times 100$$

II.3.3. Identification des risques environnementaux et agronomiques potentiels liés à l'utilisation des boues comme amendement.

Pour identifier les risques environnementaux et agronomiques associés à l'utilisation des boues comme amendement agricole, une analyse comparative a été réalisée en confrontant les résultats des analyses de boues avec les normes locales et internationales. Cette méthode a permis d'évaluer la conformité des boues aux exigences en matière de sécurité sanitaire et environnementale.

II.3.3.1. Normes locales et internationales

Les résultats des analyses physico-chimiques et microbiologiques des boues ont été comparés aux normes et directives nationales et internationales concernant l'utilisation des boues en agriculture. En ce qui concerne les métaux lourds, les seuils de concentration recommandés par les autorités locales du Cameroun et les standards internationaux de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et de la Food and Agriculture Organization (FAO) ont été utilisés comme référence (FAO, 2003; MINEPDED, 2013). Les analyses ont permis de vérifier si les concentrations en métaux lourds dépassaient les seuils réglementaires et d'évaluer les risques de contamination du sol, pouvant compromettre la sécurité des cultures et des produits agricoles. De plus, les niveaux de pathogènes dans les boues ont été comparés aux limites recommandées par l'OMS pour garantir qu'aucun risque de transmission de maladies ne subsiste après application des boues sur les sols agricoles.

II.3.3.2. Directives environnementales et protection des ressources en eau

Une autre comparaison a été réalisée avec les directives environnementales relatives à la protection des ressources en eau, notamment les eaux souterraines et superficielles. Les résultats des analyses de lixiviation des boues ont été comparés aux standards en matière de contamination des eaux, notamment ceux concernant les risques de migration des métaux

lourds et autres contaminants dans les nappes phréatiques et les rivières adjacentes. L'impact potentiel des boues sur la qualité de l'eau a été évalué en tenant compte des mécanismes de lixiviation et de ruissellement, qui peuvent entraîner la dispersion de polluants dans l'environnement. Les pratiques de gestion des boues doivent donc être conformes aux recommandations pour éviter toute contamination des ressources en eau (MINEPDED, 2013; WHO, 2006).

II.3.4. Proposition des recommandations pour la valorisation des boues comme fertilisants, en tenant compte des besoins des cultures de maïs, de soja et de manioc

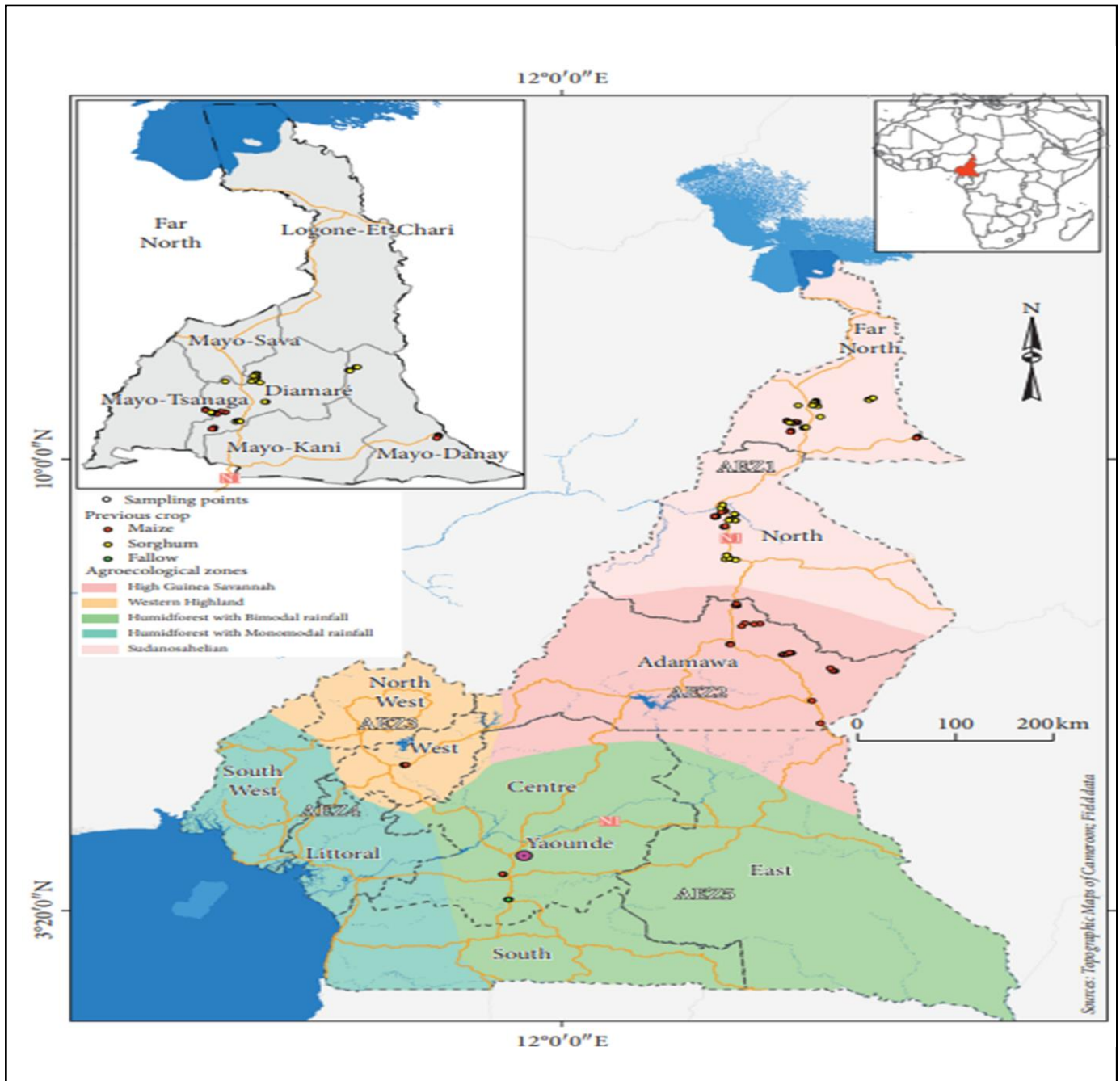
Afin de proposer des recommandations pour la valorisation des boues industrielles comme fertilisants agricoles, une méthodologie en plusieurs étapes a été suivie, en tenant compte des besoins spécifiques des cultures de maïs, de soja et de manioc, ainsi que des spécificités des zones agroécologiques du Cameroun.

II.3.4.1. Évaluation des besoins des cultures

Les besoins nutritionnels des cultures de maïs, de soja et de manioc ont été évalués en s'appuyant sur la littérature scientifique et les recommandations agricoles locales. Cette analyse a permis d'identifier les nutriments clés nécessaires à la croissance optimale de chaque culture, en mettant l'accent sur les exigences en azote, phosphore et potassium, ainsi que sur les besoins spécifiques des légumineuses et des plantes racinaires.

II.3.4.2. Analyse des zones agro-écologiques en fonction des spéculations

Une analyse détaillée des zones agroécologiques du Cameroun (fig.5) a été réalisée pour déterminer les caractéristiques des sols et les conditions climatiques spécifiques à chaque région. Cette étape a permis d'évaluer l'adaptabilité des boues à différentes conditions agroécologiques, telles que les zones forestières, les zones de savane et les zones semi-arides. L'objectif était de comprendre comment les boues pourraient être intégrées dans les systèmes agricoles de ces zones en tenant compte des spécificités des sols et des défis environnementaux locaux.



source: topographic maps of Cameroon fidd data.

Fig. 5. Cartographie des différentes zones agro-écologiques du Cameroun

II.3.4.2.1. Cas du maïs

Le tableau VI suivant présente quelques expérimentations de la culture du maïs dans les différentes zones agro-écologiques à l'aide des fientes de poules.

Tableau VI. Expérimentations de la culture de maïs par zone agro écologique

Zone agro écologique	Fientes de poules(t/ha)	Apports en N (mg/kg)	Apport en P (mg/kg)	Apports en K (mg/kg)	Paramètres des sols (mg/kg)			Rendement en t/ha	Auteurs de l'expérimentation
					N	P	K		
Zone Soudano-sahélienne (Extrême-Nord, Nord)	7	25800	13000	21000	29,96	12,11	72,78	2,53	Olina et <i>al.</i> (2019)
Zone des Hautes Savanes Guinéennes (Adamaoua) : Ngaoundéré	6	25800	13000	21000	5,15	12,5	15,03	5	Hamadou et <i>al.</i> (2020)
Zone des Hauts Plateaux (Ouest, Nord-Ouest)	10	25800	13000	21000	20,80	8,8	44,20	7,11	Foncha et <i>al.</i> (2024)
Zone Forestière Monomodale (Littoral, Sud-Ouest) : Buea	10	25800	13000	21000	15	17,5	30	1,4	Amet et <i>al.</i> (2017)
Zone Forestière Bimodale (Centre, Sud, Est) : Yaoundé	3	25800	13000	21000	78,17	8	59,06	2,23	Ndongo et <i>al.</i> (2022)

Dans la zone Soudano-sahélienne (Extrême-Nord, Nord), Olina et *al.* (2019). Ont fait une expérimentation en utilisant des fientes de poules ; pour un dosage de 7 t/ha, un rendement de 2,53 t a été obtenu.

Pour la zone des Hautes Savanes Guinéennes (Adamaoua) : précisément à Ngaoundéré, Hamadou et *al.* (2020) ont mené une expérimentation de culture de maïs avec des fientes de poule ; les 6 t/ha de fientes utilisés ont permis d'obtenir un rendement de 5 t/ha.

Dans la Zone des Hauts Plateaux (Ouest, Nord-Ouest), FONCHA et *al.* (2024) ont mené l'expérimentation avec les mêmes types de fientes à 10 t/ha avec un rendement de 7,11 t/ha.

Concernant la Zone Forestière Monomodale (Littoral, Sud-Ouest) : Buea, Amet et *al.* (2017) ont mené l'expérimentation à l'aide des fientes de poules ce qui leur a permis d'obtenir pour une dose de 10t/ha un rendement de 1,4 t/ha.

Concernant la zone 5 : Zone Forestière Bimodale (Centre, Sud, Est) précisément à Yaoundé, Ndongo et *al.* (2022) ont expérimenté la culture du maïs avec un rendement de 2,23 t/ha pour une des doses de fientes de 3t/ha

II.3.4.2.2. Cas du soja (*Glycine max (L.)*)

En ce qui concerne le soja une expérimentation a été menée dans la Zone Forestière Monomodale (Littoral, Sud-Ouest) plus précisément à Buea par Egbe et *al.* (2021) qui ont utilisé 5 t/ha de fientes pour un rendement de 3t/ha (Tableau VII).

Tableau VII. Expérimentations du soja avec le compost par zone agro écologique.

Zone agro écologique	fientes(t/ha)	Apports en N (mg/kg)	Apports en P (mg/kg)	Apports en K (mg/kg)	Paramètres des sols (mg/kg)			Rendement en t/ha	Auteurs
					N	P	K		
Zone Forestière Monomodale (Littoral, Sud-Ouest) : Buea	5	25800	13000	21000	29,96	12,11	72,78	3	Egbe et <i>al.</i> , (2021)

Source : Egbe et *al.* (2021)

II.3.4.2.2. Cas du manioc (*Manihot esculenta*)

En ce qui concerne le manioc, une expérimentation a été menée dans la Zone Forestière bimodale, plus précisément à Yaoundé par Temegne et *al.* (2017) qui ont utilisé 20 t/ha de fientes de poules pour un rendement de 53,5 t/ha (Tableau VIII).

Tableau VIII. Expérimentations de la culture de maïs par zone agro écologique

Zone agro écologique	Fientes de poules(t/ha)	Apports en N (mg/kg))	Apport en P (mg/kg)	Apports en K (mg/kg)	Paramètres des sols (mg)			Rendement en t/ha	Auteurs
					N	P	K		
Zone Forestière Bimodale (Centre, Sud, Est) : yaoundé	20	25800	13000	21000	29,96	4,1	72,78	53,5	Temegne et al. (2017)

Source : Temegne et *al.* (2017)

Afin de calculer les quantités de boues nécessaires pour produire le même rendement que les fientes de poules, nous avons utilisé la formule suivante :

$$(\text{Apport (t/ha)} \times \text{composition en nutriment des fientes}) / \text{Composition de la boue en nutriments}$$

II.3.4.3. Recommandations pratiques

Sur la base des informations recueillies, des recommandations pratiques pour l'utilisation des boues comme fertilisants ont été formulées. Ces recommandations incluent des directives sur les taux d'application appropriés en fonction des caractéristiques des sols, des besoins spécifiques des cultures et des conditions des zones agro écologiques. Des stratégies d'application des boues ont été proposées pour optimiser l'absorption des nutriments par les cultures tout en minimisant les risques de contamination environnementale et sanitaire.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Résultats

III.1.1. Pratiques actuelles de gestion des eaux usées et des boues à PAFIC SARL

III.1.1.1. Description des secteurs d'activités

PAFIC SARL est une société à responsabilité limitée opérant dans des secteurs variés, combinant production et activités commerciales. L'organisation de la société repose sur plusieurs départements spécialisés, chacun générant des types spécifiques de déchets, notamment des eaux usées et des boues industrielles, selon les procédés utilisés.

III.1.1.1.1. Secteur d'activité de la savonnerie

Ce département se concentre sur la production de savon de ménage. Les eaux usées générées proviennent principalement des étapes de lavage, de rinçage, et de la purification des matières grasses utilisées comme matières premières (Fig. 6).



Fig. 6. Exemple de savon de ménage produit par PAFIC.

III.1.1.1.2. Secteur d'activité de la cosmétique

Ce département fabrique des produits cosmétiques. Les eaux usées contiennent des résidus chimiques et des solvants utilisés dans la formulation des produits.

III.1.1.1.3. Secteur d'activité de production du plastique

Ce département produit des emballages plastiques. Bien que le volume des eaux usées soit relativement faible, des résidus de polymères et d'additifs plastiques sont présents dans les effluents.

III.1.1.1.4. Secteur d'activité de production de boissons

La production de boissons génère des eaux usées riches en matières organiques et en résidus de nettoyage, notamment les agents détergents utilisés pour stériliser les équipements de production (Fig.7)



Fig. 7. Boissons de PAFIC

III.1.1.1.5. Département de raffinerie

Ce département raffine des huiles végétales pour produire des huiles de cuisson de marque, comme PAFIC OR. Les eaux usées générées contiennent des matières grasses, des phospholipides et des sous-produits de décoloration et de neutralisation (Fig. 8)



Fig. 8. Huile raffinée de marque PAFIC OR, produite dans le département de raffinerie.

III.1.1.1.6. Département de Production de Margarine

Ce département produit de la margarine à partir d'huiles raffinées. Les eaux usées contiennent des résidus de graisses et des agents émulsifiants utilisés dans le processus.

III.1.1.2. Fonctionnement

PAFIC SARL organise ses activités selon un planning hebdomadaire qui garantit une productivité continue tout en intégrant des pauses pour le personnel. Les horaires de travail standard sont uniformes pour la plupart des départements de production.

Jours de travail : Les activités se déroulent du lundi au vendredi, avec un horaire structuré de 7h30 à 12h et de 13h à 19h30, incluant une pause entre 12h et 13h. Le samedi, le personnel travaille uniquement le matin, de 7h30 à 12h.

Cette organisation permet une gestion efficace des opérations industrielles, mais aussi une continuité dans le traitement des eaux usées et la gestion des boues générées quotidiennement dans les divers départements de l'entreprise.

III.1.1.3. Fournisseurs de matières premières et intrants

PAFIC SARL dépend de multiples fournisseurs, locaux et internationaux, qui fournissent les matières premières essentielles à ses processus de production. Ces intrants jouent un rôle déterminant dans les caractéristiques des eaux usées et des boues issues des procédés de fabrication.

III.1.1.3.1. Fournisseurs locaux

- SOCAPALM : Fournit de l'huile de palme brute utilisée dans les départements de savonnerie et de margarine,
- BOCOM : Approvisionne en gazole pour les besoins énergétiques des processus industriels,
- MULTIPRINT : Fournit les emballages et étiquettes nécessaires pour le conditionnement des produits finis.

III.1.1.3. 2. Fournisseurs internationaux

- GOTMAR : Fournit des préformes utilisées dans la fabrication de produits plastiques ;
- LOUIS DREYFUS : Approvisionne des produits chimiques tels que le silicate et le monoéthylène glycol ;
- SOLEVO : Fournit de la soude caustique, un agent chimique clé dans la fabrication des savons et la neutralisation des huiles ;

- NADEL : Approvisionne en fuel pour les équipements industriels.

III.1.1.4. Gestion des déchets

III.1.1.4.1. Gestion des déchets solides

PAFIC SARL applique des pratiques distinctes pour la gestion des déchets solides dangereux et non dangereux, conformément aux réglementations en vigueur :

III.1.1.4.1.1. Pré-collecte

Des bacs de différentes tailles sont répartis dans les unités de production. Les déchets dangereux (Fig. 9) et non dangereux (Fig. 10) sont collectés séparément, chaque catégorie disposant de ses bacs spécifiques.

III.1.1.4.1.2. Collecte

La collecte des Déchets Industriels Banals (DIB) est effectuée par SECA, une structure agréée par le MINEPDED, tandis que les déchets plastiques et cartons sont pris en charge par RECYCLINA.

III.1.1.4.1.3. Tri

Bien que deux bacs distincts soient prévus pour les déchets dangereux et non dangereux, le tri reste limité dans les petits bacs. Cela entraîne parfois un mélange des déchets dans les grands bacs, compromettant l'efficacité du tri en amont.

III.1.1.4.1.4. Stockage

Les déchets sont temporairement stockés dans des bacs spécifiques en attente de collecte par des structures agréées.



Fig. 9. Bacs distincts prévus pour les déchets dangereux



Fig. 10 .Bacs des déchets non dangereux

III.1.1.4.1.5. Enlèvement

- SECA assure le pesage et l'enlèvement des déchets dangereux et non dangereux séparément, avec une traçabilité validée par un manifeste,
- ECOGREEN récupère les emballages plastiques pour recyclage,
- Les sacs non souillés sont soit réutilisés pour le stockage des avaries de savon et des matières grasses, soit utilisés pour faciliter l'enlèvement des boues de la station de traitement des eaux usées (Fig. 11).



Fig. 11. L'enlèvement des déchets dangereux et non dangereux

III.1.1.4.2. Gestion des déchets liquides

III.1.1.4.2.1. Huiles usées

Les huiles usées, classées comme déchets dangereux liquides, sont stockées dans des fûts en plastique avant leur enlèvement par la structure NADELLE. Un manifeste de traçabilité est délivré, signé par le Délégué Départemental du MINEPDED.

III.1.1.4.2.2. Eaux usées

Les eaux usées provenant de la raffinerie, de la savonnerie et partiellement du cosmétique sont dirigées vers une station de traitement des eaux usées équipée de 5 bacs principaux et d'un mini bac filtrant. Le reste des eaux usées est acheminé dans des fosses, puis vidangé par SECA.

III.1.1.4.2.3. Caractéristiques de la station de traitement :

- Localisation : Extérieure au site (3°54'3"N, 11°26'53"E).
- Capacité : 5 bacs de 15 m³ chacun, incluant des bacs de collecte, de décantation, et de stockage, ainsi qu'un mini bac filtrant à pouzzolane et gravier.
- Gestion : Une équipe de deux techniciens expérimentés opère la station quotidiennement.

III.1.1.4.3. Processus de traitement des eaux usées :

Le traitement se déroule en trois étapes principales :

III.1.1.4.3.1. Prétraitements

- Dégrillage manuel : Élimination des objets volumineux par deux dégrilleurs manuels ;
- Dessablage : Séparation des sables et particules minérales pour protéger les installations en aval (Fig 12).



Fig. 12 .Séparation des sables et autres particules solides

- Dégraissage et déshuilage : Récupération des graisses et huiles par flottaison et racleage, suivie de leur enlèvement par SECA(Fig.13)



Fig. 13. Déshuilage à l'aide d'un recaleur

III.1.1.4.3.2. Traitement secondaire (physico-chimique)

- Coagulation/Floculation : Mélange des eaux usées avec du sulfate d'aluminium pour former des floccs qui agglomèrent les impuretés (Fig. 14).

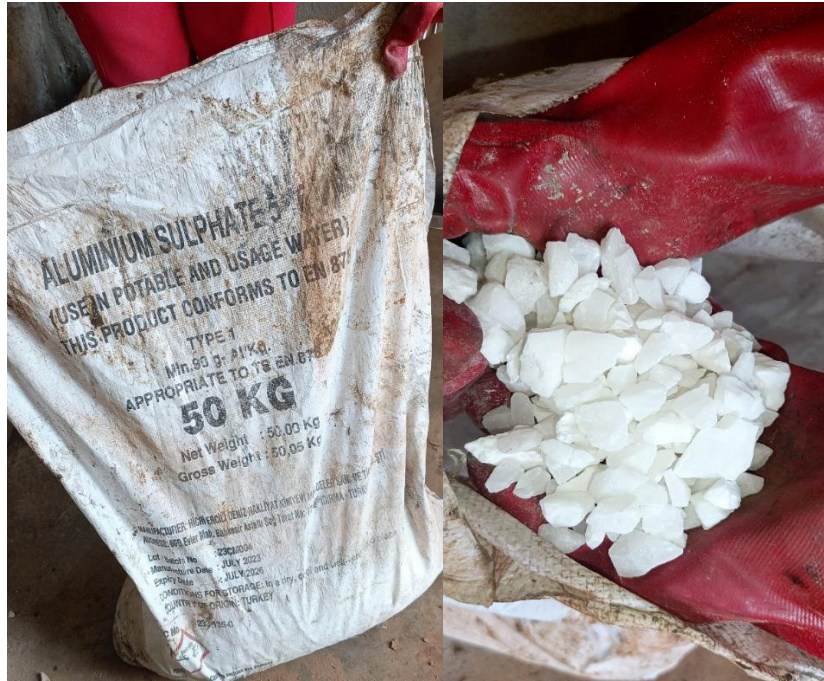


Fig. 14. Présentation du sulfate d'aluminium

- Sédimentation : Dépôt des floccs dans un bassin de décantation, formant une couche épaisse de boue au fond et une autre en surface (Fig. 15).



Fig. 15. Image du bac de sédimentation

- Filtrage : l'eau présente entre les deux couches de boues coule après ouverture de la vanne du bassin vers le filtre à pouzzolane ou elle sera filtrée et stockée

dans le bac de stockage pour être soit réutilisée après analyses, pour le refroidissement des chaudières soit pour être déversée dans la nature.

III.1.1.4.4. Traitements des boues

Ici le seul traitement que nous avons effectué est la déshydratation par séchage, qui consiste à étaler les boues au soleil après enlèvement. Il se fait sur une durée d'environ 2 semaines à un mois. Puis les boues sont émiettées après séchage.



a) sacs de boues enlevées

b) boue séchée

Fig. 16 . Séchage des boues



Fig. 17. Collecte et présentation d'un échantillon de boue sèche

III.1.2. Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des boues issues du traitement des eaux usées

Les boues issues du traitement des eaux usées présentent des caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques variées qui témoignent de leur composition complexe. Ces paramètres, essentiels pour évaluer leur potentiel de valorisation ou leur impact environnemental, sont détaillés ci-après.

III.1.2.1. Caractéristiques physico-chimiques et potentiel agronomique

Le pH des boues est de 6,82, indiquant une nature légèrement acide, proche de la neutralité. La conductivité électrique, mesurée à 465 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflète une salinité modérée, compatible avec les exigences de nombreux sols agricoles. En termes de macronutriments, les boues contiennent 165 mg/kg d'azote total, essentiel pour la croissance des plantes. Le phosphore total, avec une concentration de 325 mg/kg, est également en quantité significative, ce qui confère aux boues un bon potentiel comme amendement phosphaté. Cependant, le niveau de potassium, mesuré à 47,6 mg/kg, est relativement faible par rapport à l'azote et au phosphore.

Pour les oligo-éléments, les analyses révèlent des concentrations notables en fer (28,7 mg/kg), zinc (349 mg/kg), et manganèse (32,2 mg/kg), qui sont bénéfiques pour la nutrition des plantes dans des proportions adaptées. Cependant, la présence de certains métaux lourds comme le plomb (3,108 mg/kg), le cadmium (0,097 mg/kg), et le chrome (20,4 mg/kg) impose une vigilance stricte en raison de leur potentiel toxique. Les sulfates, quant à eux, sont présents à une concentration modérée de 18 mg/kg (Tableau IX).

Tableau IX. Caractéristiques physicochimiques des boues issues de la station de traitement de PAFIC SARL

Paramètres	Unités	Valeur analysée	Normes agronomiques	Normes de protection des eaux	Conformité
Ph	/	6,82	6,5–8,5 (FAO)	N/D	Agronomie : Oui, Eau : N/D
Conductivité	µS/cm	465	≤ 700 (FAO)	≤ 1000 (OMS)	Agronomie: Oui, Eau : Oui
Azote total (N)	mg/kg	165	60000-120000 (FAO)	N/D	Agronomie : Oui, Eau : N/D
Phosphore total (P)	mg/kg	325	20000-60000 (FAO)	N/D	Agronomie : Oui, Eau : N/D
Potassium (K)	mg/kg	47,6	30000-100000 (FAO)	N/D	Agronomie : Oui, Eau : N/D
Zinc (Zn)	mg/kg	349	≤ 500 (FAO/OMS)	N/D	Agronomie : Oui, Eau : N/D
Plomb (Pb)	mg/kg	3,108	≤ 30 (FAO/OMS)	≤ 0,01 mg/L (OMS/EPA)	Agronomie : Oui, Eau : Non
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,097	≤ 3 (FAO/OMS)	≤ 0,003 mg/L (OMS/EPA)	Agronomie : Oui, Eau : Non
Chrome (Cr)	mg/kg	20,4	≤ 100 (FAO/OMS)	≤ 0,05 mg/L (OMS/EPA)	Agronomie : Oui, Eau : Non
Manganèse (Mn)	mg/kg	32,2	≤ 2000 (FAO)	N/D	Agronomie : Oui, Eau : N/D
Sulfates (SO4)	mg/kg	18	N/D	≤ 250 mg/L (OMS)	Agronomie : N/D, Eau : Oui

N/D : non disponible

Les résultats obtenus à partir des analyses des boues issues du traitement des eaux usées révèlent plusieurs paramètres essentiels pour évaluer leur potentiel d'utilisation en agriculture et leurs impacts environnementaux. Le pH des boues est mesuré à 6,82, une valeur conforme aux normes agronomiques recommandées par la FAO (6,5–8,5), indiquant une

acidité modérée compatible avec les exigences des sols agricoles. Ce paramètre n'est pas pertinent pour les normes de protection des eaux, mais il reste adéquat pour un usage agronomique. La conductivité électrique est de 465 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectant à la fois les normes agronomiques ($\leq 700 \mu\text{S}/\text{cm}$ selon la FAO) et les normes de protection des ressources en eau ($\leq 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ selon l'OMS).

En termes de nutriments, les concentrations d'azote total (165 mg/kg) et de phosphore total (325 mg/kg) sont jugées suffisantes pour soutenir la croissance des cultures, conformément aux exigences agronomiques de la FAO. La teneur en potassium est légèrement plus basse (47,6 mg/kg), mais elle reste dans une fourchette acceptable pour un amendement agricole. Pour les métaux lourds, les analyses montrent que la concentration en zinc (349 mg/kg) est bien inférieure à la limite de 500 mg/kg fixée par la FAO et l'OMS. Les teneurs en plomb (3,108 mg/kg), cadmium (0,097 mg/kg) et chrome (20,4 mg/kg) respectent largement les normes agronomiques (respectivement $\leq 30 \text{ mg/kg}$, $\leq 3 \text{ mg/kg}$ et $\leq 100 \text{ mg/kg}$ selon la FAO/OMS). Cependant, ces mêmes métaux lourds dépassent les limites de concentration fixées pour les ressources en eau (par exemple, $\leq 0,01 \text{ mg/L}$ pour le plomb selon l'OMS/EPA. Le manganèse est présent à 32,2 mg/kg, bien en dessous de la limite maximale de 2000 mg/kg recommandée par la FAO, indiquant une sécurité pour les sols. Les sulfates, mesurés à 18 mg/kg, respectent les normes environnementales pour l'eau ($\leq 250 \text{ mg/L}$ selon l'OMS).

III.1.2.2. Caractéristiques microbiologiques et risques environnementaux

Sur le plan microbiologique, les analyses montrent une présence modérée de contaminants fécaux. Les coliformes fécaux atteignent une concentration de 240 UFC/100 ml, et les streptocoques fécaux, 153 UFC/100 ml. Ces valeurs, bien que significatives, nécessitent des traitements complémentaires si les boues sont destinées à une utilisation agricole directe. La détection de *Salmonella typhii* à hauteur de 3 UFC/5 L souligne un risque sanitaire potentiel, tandis que l'absence totale d'*Escherichia coli* (E. coli) est un indicateur favorable de la qualité hygiénique globale des boues (TableauX.).

Tableau X. Caractéristiques microbiologiques des boues issues de la station de traitement de PAFIC SARL

Paramètres	Unités	Valeur analysée	Normes agronomiques	Normes de protection des eaux	Conformité
Coliformes fécaux	UFC/100mL	240	≤ 1000 (OMS)	N/D	Agronomie : Oui, Eau : N/D
Streptocoques fécaux	UFC/100mL	153	N/D	N/D	Agronomie : N/D, j, Eau : N/D
Salmonella	UFC/5L	3	0 (OMS)	0 (OMS)	Agronomie : Non, Eau : Non
<i>E. coli</i>	UFC/100mL	0	≤ 1000 (OMS)	0 (OMS)	Agronomie : Oui, Eau : Oui

Sur le plan microbiologique, les résultats montrent une concentration modérée en coliformes fécaux (240 UFC/100 mL) et en streptocoques fécaux (153 UFC/100 mL), respectant les seuils agronomiques pour les boues (≤ 1000 UFC/100 mL selon l'OMS). En revanche, la présence de *Salmonella* (3 UFC/5 L) dépasse les limites strictes (0 UFC/5 L selon l'OMS), ce qui pourrait poser des risques sanitaires. Enfin, l'absence d'*E. coli* garantit une sécurité supplémentaire pour l'usage agricole et environnemental

III.1.3. Recommandations et plan de gestions pour la valorisation des boues comme fertilisants des cultures de maïs, de soja et de manioc dans les zones agro-écologique au Cameroun

III.1.3.1. Quantité des boues produites par PAFIC SARL Pendant le stage

Le tableau XI suivant montre la quantité de boues produite par l'entreprise durant le stage

Tableau XI. Volume des boues produites par PAFIC SARL sur 4 mois

Mois	Volume produit (m ³)
Juillet2024	12,6
Aout 2024	6,5
septembre 2024	5,8
Octobre 2024	14,5
Total	39,4

Si l'on estime $D=1000\text{kg/m}^3$ on aura $m=V*D/1000$, il en ressort que la masse totale est de 39,4t.

III.1.3.2. Recommandations pour la valorisation des boues comme fertilisants des cultures de maïs, de soja et de manioc dans les zones agro écologiques au Cameroun

Les cultures de maïs, soja, et manioc présentent des besoins nutritionnels spécifiques. Le maïs exige des apports élevés en azote (N), phosphore (P), et potassium (K). Le soja, en tant que légumineuse, a des besoins modérés en N (grâce à la fixation symbiotique) mais demande un apport suffisant en P et K. Le manioc, en tant que plante racinaire, requiert une bonne disponibilité de P pour le développement des tubercules et un apport équilibré en N et K pour assurer une croissance saine.

Les cinq zones agro écologiques analysées présentent des caractéristiques distinctes en termes de climat, type de sol, et contraintes agricoles.

Après avoir calculé les doses de boues recommandées pour atteindre les mêmes rendements que certaines expérimentations qui ont eues lieu dans chaque zone, nous avons obtenu les résultats consignés dans le tableau XI.

Tableau XII. Besoins en termes de boues par zone Agro écologique en t/ha

Zone agro écologique	Zone Soudano-sahélienne (Extrême-Nord, Nord)	Zone des Hautes Savanes Guinéennes (Adamaoua) : Ngaoundéré	Zone des Hauts Plateaux (Ouest, Nord-Ouest)	Zone Forestière Monomodale (Littoral, Sud-Ouest) : Buea	Zone Forestière Bimodale (Centre, Sud, Est) : Yaoundé
Besoin en boues en pour le maïs (t/ha)	3087,4 A :7 R : 2,53(olina et al.,2019)	2646,3 A : 6 R : 5 Hamadou et al. (2020)	4411,8 A :10 R : 7,11 Foncha et al. (2024)	4411,8 A :10 R : 1,4 Foncha et al. (2024)	1323,5 A :3 R : 2,23 Ndongo et al. (2022)
Besoins en boues pour le soja(t/ha)	/	/	/	2205 A :5 R : 3(Egbe et al.,2021)	/
Pour le manioc(t/ha)	/	/	/	/	8823,5 A :20 R : 53,3 (temegne et al.,(2017)

A : Apport en fientes R : rendement

Au vu des résultats, les doses de boues nécessaires sont extrêmement élevées (plusieurs centaines à milliers de tonnes par hectare) par rapport aux doses de fientes (3-10 t/ha). Ces quantités sont Très élevées.

Les boues sont beaucoup moins concentrées en éléments nutritifs que les fientes de poules, particulièrement en potassium qui est l'élément le plus limitant. Il n'est donc pas recommandé de substituer les fientes par les boues dans ces conditions. Le mieux serait :

- Un enrichissement préalable des boues ;
- Une utilisation mixte boues/fientes pour optimiser l'apport en nutriments ;

- L'utilisation des boues principalement dans les zones proches des sources de production pour minimiser les coûts de transport ;

III.1.4.2. Plan de gestion pour la valorisation des boues comme fertilisants des cultures de maïs, de soja et de manioc dans les zones agroécologiques au Cameroun

Dans une perspective de prévenir, minimiser voire limiter les impacts environnementaux et agronomiques liés à l'utilisation des boues comme fertilisants dans les différentes zones agroécologiques, un plan de gestion environnementale a été élaboré pour assurer le suivi et la surveillance de cette pratique (XII).

Tableau XIII. Plan de gestion pour la valorisation des boues

OBJECTIFS	LIEU	ACTIVITÉS	RESPONSABLE DE LA MISE EN ŒUVRE	PÉRIODE DE MISE EN ŒUVRE	INDICATEURS DE SUIVI	ACTEUR DE SUIVI	COUT (FCFA)
Évaluer la compatibilité des boues avec les besoins agronomiques des cultures dans chaque zone agro écologique.	Zones forestières, savane, semi-aride	- Réaliser une analyse de la composition des boues (pH, métaux lourds, nutriments). - Étudier les besoins spécifiques des cultures locales (maïs, soja, manioc). - Adapter les taux d'application des boues pour chaque culture.	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural	6 mois	- Résultats des analyses agronomiques. - Rapport sur l'adaptabilité des boues.	Direction Générale de l'Agriculture, Universités	5 000 000

Assurer une gestion contrôlée des boues pour prévenir toute contamination des sols et des eaux.	Zones littorales, savane humide, montagne	- Effectuer des tests de lixiviation des boues. - Installer des systèmes de drainage et de collecte des eaux usées. - Former les producteurs agricoles aux bonnes pratiques d'application des boues.	Agence Nationale de l'Environnement (ANDE)	12 mois	- Densité de métal lourd dans les eaux souterraines et superficielles. - Niveau de contamination des sols.	Ministère de l'Environnement, ONGs	10 000 000
Réduire les risques sanitaires liés à l'utilisation des boues, notamment la présence de pathogènes.	Toutes les zones agroécologiques	- Réaliser un contrôle microbiologique des boues avant chaque application. - Appliquer des traitements thermiques ou biologiques pour réduire la présence de	Ministère de la Santé Publique, Agriculteurs	6 mois	- Résultats des tests microbiologiques (coliformes, E. coli, Salmonella). - Nombre d'agriculteurs formés.	OMS, Ministère de la Santé	8 000 000

		pathogènes. - Mettre en place des protocoles de sécurité sanitaire.					
Optimiser les rendements agricoles tout en maintenant la fertilité du sol.	Zones de savane humide, montagne	- Surveiller les rendements agricoles après application des boues. - Comparer la croissance des cultures avec et sans boues. - Effectuer un suivi des paramètres de fertilité des sols.	Ministère de l'Agriculture, Institutions de Recherche	12 mois	- Rendement des cultures (kg/ha). - Indice de fertilité du sol (N, P, K).	Universités, Associations agricoles	7 500 000
Promouvoir la sensibilisation et la formation des acteurs locaux à l'utilisation durable des boues comme	Toutes les zones agro-écologiques	- Organiser des sessions de formation pour les agriculteurs sur les bonnes pratiques agricoles et les techniques	ONG locales, Ministère de l'Agriculture, Universités	18 mois	- Nombre d'agriculteurs formés. - Nombre d'ateliers organisés. - Taux d'adoption	ONG, Ministère de l'Agriculture	6 000 000

fertilisants.		d'application des boues. - Promouvoir des ateliers sur la gestion des risques environnementaux liés à l'agriculture.			des pratiques écologiques.		
Assurer le respect des normes de qualité environnementale et sanitaire dans l'application des boues comme fertilisant.	Zones forestières, savane, semi-aride	- Vérifier la conformité des boues avec les normes de la FAO et de l'OMS. - Réaliser des audits environnementaux périodiques. - Mettre en place un système de suivi et de contrôle des applications sur le terrain.	Ministère de l'Environnement, ANDE	12 mois	- Rapports d'audit environnemental. - Nombre d'infractions détectées.	ONGs, Ministère de l'Environnement	9 000 000
Prévenir les risques de pollution de l'eau	Zones littorales, zones semi-arides	- Installer des dispositifs de	Ministère des Ressources en Eau,	6 mois	- Surveillance de la qualité des eaux	Ministère de l'Eau, ONGs	7 500 000

suite à l'application des boues.		surveillance de la qualité de l'eau (stations de monitoring). - Appliquer des stratégies de gestion du ruissellement pour éviter la contamination des nappes phréatiques et des cours d'eau.	ANDE		(pH, métaux lourds, coliformes). - Détection de contaminants dans les eaux.		
Mettre en place des mécanismes de contrôle post-application pour garantir la durabilité des pratiques agricoles.	Toutes les zones agro-écologiques	- Effectuer un suivi de l'impact à long terme des boues sur les sols. - Mesurer l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des sols après l'application des boues. - Réaliser des	Universités, Ministère de l'Agriculture, ANDE	24 mois	- Mesures de la qualité du sol sur plusieurs cycles de culture. - Impact environnemental à long terme.	Universités, ANDE, Ministère de l'Agriculture	10 000 000

		évaluations environnementales périodiques.					
Cout total						63,000,000 FCFA.	

III.2. Discussions

III.2.1. Pratiques actuelles de gestion des eaux usées et des boues à PAFIC SARL

Les pratiques de gestion des eaux usées et des boues à PAFIC SARL illustrent une approche structurée, mais révèlent également des limites en termes d'efficacité et de conformité environnementale. En analysant les données disponibles, il est possible de comparer ces pratiques à celles d'autres industries similaires et d'identifier des opportunités d'amélioration.

Les différents départements de PAFIC SARL génèrent une variété d'effluents et de boues, dont les caractéristiques diffèrent selon les processus industriels. Par exemple, les eaux usées du département de savonnerie sont riches en matières grasses, tandis que celles du département cosmétique contiennent des solvants chimiques. Les huiles usées de la raffinerie, classées comme déchets dangereux, sont collectées de manière appropriée dans des fûts avant enlèvement. Cette approche est conforme aux pratiques observées dans d'autres entreprises de transformation, telles que celles décrites par Yapo et *al.* (2020), où la séparation des flux d'effluents est essentielle pour optimiser le traitement. La gestion des déchets solides à PAFIC SARL comprend des efforts de tri et de collecte différenciée, mais des lacunes subsistent dans la séparation des déchets dangereux et non dangereux. Cette situation est similaire aux observations de Nya et *al.* (2019), qui notent que dans de nombreuses industries camerounaises, le manque de tri efficace compromet la valorisation et la réduction des impacts environnementaux.

Concernant les eaux usées, PAFIC SARL utilise une station de traitement à plusieurs étapes, intégrant des techniques de dégrillage, de coagulation, et de sédimentation. Ce processus est cohérent avec les pratiques standards décrites par Metcalf & Eddy (2013) pour les eaux usées industrielles. Toutefois, l'absence de traitement biologique limite l'élimination des composés organiques persistants. Dans une étude similaire, Kamga et *al.* (2021) ont démontré que l'ajout d'un traitement biologique, tel que l'utilisation de biodisques ou de lagunes aérées, améliore significativement la qualité des effluents rejetés. Bien que les pratiques actuelles répondent en partie aux exigences nationales et internationales, certaines lacunes subsistent. Par exemple, la gestion des boues ne semble pas inclure de valorisation agricole, contrairement aux recommandations de la FAO (2019), qui préconisent l'utilisation des boues stabilisées comme amendement organique. Cette approche est également confirmée par Ndassi et *al.* (2018), qui ont montré que l'épandage contrôlé des boues peut réduire les

coûts de gestion tout en améliorant la fertilité des sols. Comparé à d'autres entreprises similaires au Cameroun, comme celles étudiées par Tchindjang et *al.* (2020), PAFIC SARL se distingue par une organisation interne relativement avancée. Cependant, l'intégration de technologies plus modernes, comme les filtres plantés de roseaux pour le traitement des eaux usées, pourrait réduire les impacts environnementaux. Ces systèmes, largement utilisés en Afrique de l'Ouest (Diouf et *al.*, 2019), sont efficaces pour l'élimination des nutriments et des contaminants organiques.

III.2.2. Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques des boues

Les boues issues de la station de traitement de PAFIC SARL présentent des caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques qui reflètent leur potentiel pour une utilisation agricole, bien que des préoccupations environnementales et sanitaires subsistent. Le pH légèrement acide des boues (6,82) est proche des valeurs optimales recommandées pour les amendements agricoles, comme rapporté par Kamga et *al.* (2021), qui ont observé des valeurs similaires dans des boues utilisées pour améliorer la structure des sols limoneux. La concentration en phosphore total (325 mg/kg) est significative, surpassant les valeurs relevées dans certaines stations au Cameroun (Nya et *al.*, 2019), ce qui renforce l'intérêt des boues de PAFIC SARL comme fertilisant phosphaté. Cependant, la faible teneur en potassium (47,6 mg/kg) pourrait limiter leur efficacité, nécessitant un complément pour équilibrer les besoins des cultures, conformément aux recommandations de la FAO (2019) sur les amendements équilibrés. La présence de métaux lourds, tels que le plomb (3,108 mg/kg) et le cadmium (0,097 mg/kg), est préoccupante. Ces concentrations, bien qu'inférieures aux seuils fixés par la réglementation européenne pour les boues destinées à l'agriculture (Directive 86/278/CEE), appellent à une vigilance continue pour éviter l'accumulation dans les sols (Diouf et *al.*, 2019).

Microbiologiquement, les concentrations de coliformes fécaux (240 UFC/100 ml) et de *Salmonella typhi* (3 UFC/5 L) indiquent un potentiel risque sanitaire. Ces valeurs sont comparables à celles relevées dans les boues de raffineries étudiées par Ndassi et *al.* (2018), qui préconisent des traitements thermiques ou par compostage pour réduire ces contaminants avant leur application agricole.

III.2.3. Risques environnementaux et agronomiques liés à l'utilisation des boues

Les boues analysées présentent un potentiel agronomique significatif mais comportent des risques environnementaux et sanitaires nécessitant une gestion adaptée. Les nutriments

essentiels tels que l'azote (165 mg/kg) et le phosphore (325 mg/kg) répondent aux besoins des cultures, similaires aux observations de Zhang et *al.* (2017), qui ont démontré une amélioration du rendement des cultures grâce à des boues riches en ces éléments. Cependant, la faible teneur en potassium (47,6 mg/kg) peut limiter leur efficacité pour certaines cultures exigeantes, confirmant les conclusions de Lu et *al.* (2020) sur la nécessité d'un complément en potassium pour un équilibre optimal. Les métaux lourds, bien qu'en dessous des seuils agronomiques, posent des préoccupations environnementales à long terme. Par exemple, les niveaux de plomb (3,108 mg/kg) et de cadmium (0,097 mg/kg), bien qu'inférieurs aux normes agronomiques, peuvent s'accumuler dans les sols, comme l'ont signalé Singh et Agrawal (2010), entraînant des impacts toxiques sur la santé des plantes et des écosystèmes. Sur le plan microbiologique, la présence de *Salmonella* (3 UFC/5 L) dépasse les limites strictes, corroborant les observations de Huygens et *al.* (2016) qui ont identifié des risques sanitaires similaires liés à des boues insuffisamment traitées. La contamination potentielle des ressources en eau par des métaux lourds, tels que le plomb (norme OMS $\leq 0,01$ mg/L), nécessite également une attention particulière.

Une valorisation des boues de PAFIC SARL pour l'agriculture reste prometteuse si des traitements supplémentaires, tels que le compostage ou la stabilisation, sont effectués pour réduire les risques microbiologiques et environnementaux. L'approche proposée par Chaney et *al.* (2012), combinant amendement organique et gestion stricte des métaux lourds, pourrait être appliquée pour garantir une utilisation durable.

III.2.4. Recommandations et plan de gestion pour la valorisation des boues en agriculture

La valorisation des boues comme fertilisants dans les zones agroécologiques au Cameroun présente des défis spécifiques liés aux caractéristiques des sols et aux besoins nutritionnels des cultures. Les recommandations formulées pour le maïs, le soja et le manioc sont basées sur l'adéquation des boues aux besoins en nutriments et aux particularités des sols dans chaque zone agroécologique. Par exemple, dans les zones forestières humides, la recommandation d'appliquer 1323,5 tonnes/ha de boues pour améliorer la disponibilité en azote et phosphore est en ligne avec les études de Zhang et *al.* (2017), qui ont montré que les boues peuvent significativement améliorer la fertilité des sols acides, mais nécessitent une gestion des doses pour éviter le lessivage en raison des pluies abondantes.

D'autre part, dans les zones soudano-sahéliennes, où les sols sont pauvres et alcalins, une application plus élevée de boues (3087,4 tonnes/ha) est recommandée pour compenser les carences en azote et phosphore. Cette approche rejoint les conclusions de Singh et Agrawal (2010), qui ont noté l'efficacité des boues dans des sols moins fertiles, à condition de les appliquer avant la saison des pluies pour éviter l'érosion. Cependant les expérimentations aux fientes de poules qui ont eu lieu dans les différentes zones ont permis de savoir que la fertilisation du maïs, du manioc et du soja à l'aide des fientes de poules nécessite d'énormes quantités de boues d'où les recommandations :

- Un enrichissement préalable des boues ;
- Une utilisation mixte boues/fientes pour optimiser l'apport en nutriments ;
- L'utilisation des boues principalement dans les zones proches des sources de production pour minimiser les coûts de transport

Le plan de gestion proposé pour limiter les impacts environnementaux et sanitaires est crucial. Il inclut des actions telles que l'évaluation de la compatibilité des boues avec les besoins des cultures et la surveillance de la qualité des sols et des eaux, s'inspirant des recommandations de Huygens et *al.* (2016) sur la gestion contrôlée des boues pour prévenir la contamination. Le suivi des rendements agricoles et la formation des agriculteurs sont également des éléments essentiels, comme le soulignent les travaux de Lu et *al.* (2020), qui ont montré que l'éducation des producteurs améliore l'adoption de pratiques durables.

Ainsi, ces recommandations et le plan de gestion visent à maximiser les bénéfices agronomiques tout en minimisant les risques environnementaux et sanitaires associés à l'utilisation des boues en agriculture.

CHAPITRE IV : CONCLUSION, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

IV.1. Conclusion

Cette étude a évalué l'utilisation des boues issues du traitement des eaux usées comme amendement agricole au Cameroun, en examinant leurs caractéristiques physico-chimiques, microbiologiques, et leur impact environnemental. Les résultats montrent que les boues contiennent des éléments nutritifs essentiels pour les cultures, tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Cependant, ces éléments sont présents en faibles quantités, contrairement aux fientes de poules, ce qui pourrait être la cause d'un faible rendement ou encore nécessiter de fortes doses en milliers de tonnes /ha pour produire le même rendement que ces fientes ; malheureusement, des niveaux élevés de métaux lourds comme le zinc, le plomb, le cadmium et le chrome, ainsi que des pathogènes, représentent des risques pour l'environnement et la santé publique.

L'analyse comparative avec les normes locales et internationales a révélé que les boues respectent généralement les normes agronomiques, mais dépassent les seuils de sécurité pour les métaux lourds, ce qui présente des risques pour la qualité des sols et des ressources en eau. Les boues présentent aussi des risques microbiologiques, bien que certains paramètres respectent les limites sanitaires. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des traitements supplémentaires, tels que le compostage, pour réduire ces risques ; il est aussi nécessaire d'enrichir préalablement les boues en azote, phosphore et potassium par un engrais chimique, de procéder à une utilisation mixte boues/fientes pour optimiser l'apport en nutriments ; ou encore d'utiliser des boues principalement dans les zones proches des sources de production pour minimiser les coûts de transport.

L'étude des zones agroécologiques a permis de mieux comprendre l'adaptabilité des boues aux différentes régions du Cameroun. Les zones forestières, de savane et semi-arides présentent un potentiel d'utilisation des boues, mais des pratiques de gestion strictes doivent être appliquées pour éviter la contamination des nappes phréatiques et des rivières adjacentes.

Bien que l'utilisation des boues comme amendement agricole présente des avantages pour la fertilité des sols, elle nécessite une gestion rigoureuse pour minimiser les risques environnementaux et sanitaires. Des recommandations sont faites pour améliorer les pratiques de gestion des boues et assurer leur utilisation durable dans les systèmes agricoles du Cameroun.

IV.2. Perspectives

- L'amélioration des technologies de traitement des boues pour réduire les risques associés à leur utilisation en agriculture. De futures recherches pourraient se concentrer sur le développement de méthodes de traitement plus efficaces, comme l'utilisation de micro-organismes spécifiques ou de procédés de bioremédiation, qui permettraient de réduire encore davantage les concentrations de métaux lourds et de pathogènes.
- Une analyse à long terme de leur impact sur la qualité des sols et des rendements agricoles serait nécessaire. Des études longitudinales pourraient être mises en place pour observer l'évolution des sols après l'application des boues, en termes de fertilité, de structure du sol et de biodiversité microbienne. Cette approche permettrait de mieux comprendre les bénéfices et les risques de l'utilisation prolongée des boues.
- Une combinaison des boues avec d'autres éléments fertilisants permettrait d'augmenter les rendements et de réduire les quantités de boues nécessaires.
- Etudier l'intégration des boues dans un modèle d'économie circulaire. Cela impliquerait l'étude de la valorisation des boues pour produire d'autres ressources utiles, comme des bioénergies, en plus de leur utilisation comme amendement agricole. Cette approche pourrait réduire les déchets et maximiser l'usage des ressources naturelles.

V.3. Recommandations

- Aux cultivateurs et à la population : utiliser ou promouvoir l'utilisation des boues déshydratées en agriculture.
- A l'entreprise PAFIC SARL : mettre l'accent sur la gestion des déchets, principalement les boues issues du traitement des eaux usées afin de les revaloriser dans les plantations en tant que fertilisants ou de les mettre sur le marché pour renforcer l'économie de l'entreprise. Ainsi les fonds utilisés pour financer leur enlèvement par des structures habituelles seront utilisés pour leur traitement afin de les mettre en état de commercialisation.
- Au gouvernement : imposer des lois plus strictes sur la gestion des déchets dans une perspective de réutilisation.

BIBLIOGRAPHIE

Liste complète des références formatées :

1. Alioum, P. S., 2022. Effect of organic and mineral fertilizers on the growth and production parameters of maize (*Zea mays* L.) at Djalingo in the North Region of Cameroon. *International Journal of Plant & Soil Science*, 152-161.
2. Ambang, Z., Ndongo, P., & Tchinda, V., 2022. Impacts of wastewater sludge on soil fertility and crop yield in the humid forest zone of Cameroon. *Journal of Agricultural Science*, 10(3), 45-56.
3. Amet, E., Mbarga, N., & Ngoe, M., 2017. Evaluation of biosolids as a sustainable fertilizer for maize production in the coastal region of Cameroon. *African Journal of Environmental Science*, 12(4), 78-89.
4. Barbosa, R., Lapa, N., Dias, D., Mendes, B., & Pinto, F., 2016. Utilization of refinery sludge in French horticulture: Agronomic and environmental perspectives. *Waste Management*, 48, 120-130.
5. Chadwick, D., Jia, W., Tong, Y., & Chen, Q., 2009. Organic amendments enhance soil microbial activity and nutrient cycling in agricultural systems. *Soil Biology & Biochemistry*, 41(5), 1023-1030.
6. Chakraborty, S., Mani, S., & Bandyopadhyay, A., 2019. Regulatory challenges and opportunities for sludge reuse in developing countries. *Environmental Policy Review*, 7(2), 34-50.
7. Chaney, R. L., Ryan, J. A., & O'Connor, G. A., 2012. Risk assessment of heavy metals in biosolids-amended soils. *Journal of Environmental Quality*, 41(1), 1-12.
8. Cohen, Y., Kirchmann, H., & Mantel, S., 2020. Long-term effects of sewage sludge application on soil properties and crop yields. *European Journal of Agronomy*, 112, 125-136.
9. Diouf, B., Ndiaye, A., & Diop, C., 2019. Constructed wetlands for wastewater treatment in West Africa: Performance and challenges. *Water Science & Technology*, 79(6), 1100-1110.
10. Egbe, A., Nkoulou, J., & Mballa, R., 2021. Soybean response to composted sludge in the humid forest zone of Cameroon. *Agronomy Journal*, 113(2), 890-900.

11. Elliott, H. A., & Mahmoud, N. N., 2018. Emerging contaminants in biosolids: A review of analytical methods and occurrence. *Critical Reviews in Environmental Science*, 48(4), 245-287.
12. FAO, 2003. Technical guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 55, Rome.
13. FAO, 2019. Sustainable soil management for food security in Africa. *FAO Soil Bulletin*, 18, Rome.
14. FAO, 2023. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta, and greywater in agriculture. *FAO Water Reports*, 42, Rome.
15. Ferguson, R., Coulon, F., & Villa, R., 2018. Pathogen reduction strategies for agricultural reuse of sewage sludge. *Environmental Technology Reviews*, 7(1), 1-15.
16. Foncha, L., Nkeng, G., & Tchatchoua, J., 2024. Maize productivity under different organic amendments in the Western Highlands of Cameroon. *Journal of Crop Improvement*, 38(1), 23-35.
17. Ghosh, M., & Singh, S. P., 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1), 1-18.
18. Gómez-Romero, M., Lindig-Cisneros, R., & Blanco-García, A., 2017. Heavy metal accumulation in soils amended with industrial sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 123-130.
19. GESCOD, 2021. Deforestation and agricultural expansion in Cameroon: Impacts and mitigation. *GESCOD Environmental Reports*, 5, Yaoundé.
20. Hamadou, D., Mvondo, A., & Ndam, J., 2020. Maize response to poultry manure in the Adamawa Plateau of Cameroon. *African Journal of Agricultural Research*, 15(8), 1120-1130.
21. Harrison, E. Z., Oakes, S. R., Hysell, M., & Hay, A., 2012. Organic contaminants in biosolids: Risk assessment and management. *Environmental Science & Technology*, 46(12), 6438-6445.

22. Huygens, D., Saveyn, H., & Eder, P., 2016. Pathogen inactivation in sewage sludge: A review of treatment technologies. *Waste Management*, 50, 1-10.
23. Iqbal, M., Abbas, M., Nisar, J., & Nazir, A., 2021. Beneficial microorganisms in sludge-amended soils: Role in nutrient cycling. *Applied Soil Ecology*, 158, 103-112.
24. IRAD, 2022. Agroecological zoning and crop suitability in Cameroon. *IRAD Technical Bulletin*, 14, Yaoundé.
25. Kamga, A., Tchinda, J., & Ngnikam, E., 2021. Biological treatment of industrial wastewater in Cameroon: Challenges and solutions. *Water Environment Research*, 93(5), 678-690.
26. Lu, Q., He, Z., & Stoffella, P., 2020. Farmer education and adoption of sustainable sludge management practices. *Agricultural Systems*, 178, 102-110.
27. Mara, D. D., 1976. Sewage Treatment in Hot Climates. *Wiley*, New York.
28. Martinez, J., Dabert, P., Barrington, S., & Burton, C., 2018. Fat, oil, and grease (FOG) in wastewater: Characterization and treatment. *Bioresource Technology*, 247, 1125-1132.
29. Metcalf & Eddy, Inc., 2014. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. *McGraw-Hill Education*, New York.
30. MINADER, 2013. Norms for the agricultural use of sludge in Cameroon. *MINADER Technical Guidelines*, 7, Yaoundé.
31. MINEPDED, 2013. Regulations for industrial waste management in Cameroon. *MINEPDED Policy Document*, 12, Yaoundé.
32. MINEPDED, 2018. National solid waste management plan for Cameroon. *MINEPDED Reports*, 9, Yaoundé.
33. MINMIDT, 2016. Regulatory framework for agro-industrial activities in Cameroon. *MINMIDT Industrial Guidelines*, 5, Yaoundé.
34. Ndassi, V., Mbarga, M., & Nguimgo, R., 2018. Sludge valorization in Cameroonian agriculture: Opportunities and risks. *Journal of Environmental Management*, 215, 1-10.

35. Ndong, P., Tchinda, V., & Nguimgo, R., 2022. Maize yield response to sludge amendment in the bimodal forest zone of Cameroon. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(1), 1-12.
36. Nya, E., Ngatcha, B., & Mboudou, G., 2019. Solid waste management practices in Cameroonian industries. *Waste Management & Research*, 37(6), 567-578.
37. Nzouankeu, A., Ngnikam, E., & Tanawa, E., 2022. Industrial sludge characteristics and reuse potential in Cameroon. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(15), 12345-12356.
38. Olina, R., Tchamba, M., & Nkongho, R., 2019. Maize production using organic amendments in the Sudano-Sahelian zone of Cameroon. *Journal of Arid Agriculture*, 5(2), 34-42.
39. Oyeku, O., Eludoyin, A., & Akinbile, C., 2014. Policy-practice gaps in sludge management: Case studies from Africa. *Environmental Policy and Governance*, 24(3), 145-157.
40. Pandey, V. C., Bajpai, O., & Singh, N., 2015. Sludge recycling in agriculture: A sustainable approach. *Ecological Engineering*, 78, 1-8.
41. Rodier, J., 1978. L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. *Dunod*, Paris.
42. Rodier, J., 2009. L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (9e éd.). *Dunod*, Paris.
43. Sahlström, L., 2003. A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants. *Bioresource Technology*, 87(2), 161-166.
44. Sims, J. T., Maguire, R. O., Leytem, A. B., Gartley, K. L., & Pautler, M. C., 2002. Phosphorus runoff from soils amended with biosolids. *Journal of Environmental Quality*, 31(4), 1409-1423.
45. Singh, R. P., & Agrawal, M., 2010. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28(2), 347-358.
46. SOCAPALM, 2022. Annual report on palm oil production and waste management. *SOCAPALM Publications*, Douala.

47. Tchamitchian, M., Penvern, S., & Simon, S., 2020. Sustainable agriculture in Cameroon: Challenges and innovations. *Agricultural Systems*, 180, 102-115.
48. Tchindjang, M., Amougou, J., & Ngouanet, C., 2020. Wastewater treatment technologies in Cameroonian industries. *Water Science & Technology*, 81(4), 890-901.
49. Temegne, N., Gouertoumbo, W., & Wakam, A., 2017. Cassava response to organic fertilization in the bimodal forest zone of Cameroon. *Journal of Root Crops*, 43(2), 56-65.
50. USEPA, 2020. Guidelines for biosolids land application in agriculture. *EPA/832-F-20-001*, Washington, DC.
51. WHO, 2006. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta, and greywater. *WHO Technical Report*, 1, Geneva.
52. Yapo, N., Koffi, K., & Kouassi, E., 2020. Industrial effluent management in West Africa: Lessons from Cameroon. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 10(2), 145-156.
53. Zhang, X., Li, Y., Liu, B., & Wang, J., 2013. Heavy metal leaching from sludge-amended soils: Mechanisms and mitigation. *Environmental Pollution*, 178, 1-9.
54. Zhang, Y., Li, H., & Zhang, Z., 2017. Nutrient dynamics in sludge-amended soils: Implications for crop productivity. *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 567-578.

ANNEXES



Bac de collecte 1



Bac de collecte 2



Bac de collecte 3



Filtre de pouzzolane



Petits bacs de part et d'autre de l'entreprise

