

Caractérisation physique et physico-chimique des composts dérivés des boues de vidange du District d'Abidjan (Côte d'Ivoire)

Gnagne Agness E.J.E. Yves^{1,*}, Sika Ahoua Edmond², Ahoulé Dompe G. Maxime³, Barro Bamory Bafé², Coulibaly Wagnidhanan Djénébou², Traoré Tiédaba², Ballet Tiama G. Nicaise²

¹Laboratoire de Thermodynamique et de Physico Chimie du Milieu, Université Nangui ABROGOUA, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

²Laboratoire des Sciences de l'Environnement, Université Nangui ABROGOUA, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

³Laboratoire de Géoscience et Environnement, Université Nangui ABROGOUA, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

Reçu : 05 Décembre 2025 / Reçu sous sa forme révisée : 03 Mars 2026 / Accepté : 07 Avril 2026

Résumé :

Les latrines sèches et les fosses septiques pleines sont souvent vidangées puis déversées sans traitement préalable, entraînant ainsi une pollution environnementale et des risques sanitaires accrus. Pourtant, ces boues contiennent des nutriments essentiels comme l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium et le magnésium, valorisables sous forme de compost. Dans le contexte de l'essor du maraîchage dans le District d'Abidjan, cette valorisation représente une solution durable, inscrite dans une logique d'économie circulaire. Cette étude vise à évaluer la qualité des composts issus de boues de vidange, en analysant leur teneur en éléments traces métalliques (ETM) et leur potentiel fertilisant. Des analyses physico-chimiques ont été réalisées, notamment la spectrophotométrie d'absorption atomique pour les ETM, ainsi que des tests granulométriques fondés sur les méthodes développées par le Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (CEAEQ) et celles décrites dans la littérature. Les résultats révèlent une texture grossière dominée par les particules sableuses. Les caractéristiques chimiques des composts sont globalement conformes aux standards agronomiques, avec des teneurs en ETM inférieures aux seuils réglementaires. Toutefois, une teneur relativement élevée en zinc a été relevée, ce qui impose une vigilance accrue avant utilisation agricole.

Mots-clés : Boues de vidange; Compostage; Maraîchage urbain; Éléments traces métalliques (ETM); Produits maraichers.

*Auteur correspondant:

Adresse e-mail : gaejey_2006@yahoo.fr (Y.E.J.E.A. Gnagne)
<https://doi.org/10.70974/mat10126104>



Abstract :

Dry latrines and full septic tanks are often emptied and then discharged into the environment without prior treatment, leading to environmental pollution and increased health risks. However, this sludge contains essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium, which can be recovered in the form of compost. In the context of the growth of market gardening in the District of Abidjan, this recovery represents a sustainable solution, in line with the circular economy approach. This study aims to assess the quality of compost produced from sewage sludge by analysing its trace metal content and fertilising potential. Physicochemical analyses were carried out, including atomic absorption spectrophotometry for trace metal determination, as well as granulometric tests based on methods developed by the Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (CEAEQ) and those described in the literature. The results reveal a coarse texture dominated by sandy particles. The chemical characteristics of the composts are generally in line with agronomic standards, with trace metal levels below regulatory thresholds. However, a relatively high zinc content was found, requiring increased vigilance before agricultural use.

Keywords : Sewage sludge ; Composting ; Urban market gardening ; Trace metals (TM) ; Market garden produce.

1. Introduction

La croissance démographique mondiale et l'urbanisation rapide observées au cours des dernières décennies ont accentué la pression sur les infrastructures d'assainissement. Entre 2000 et 2022, la population mondiale a augmenté de 1,8 milliard d'habitants, dont près de 1,7 milliard en milieu urbain [1]. En Afrique subsaharienne, où l'assainissement autonome demeure prédominant, entre 80 et 99 % des eaux usées domestiques sont gérées à travers des systèmes non collectifs tels que les fosses septiques et les latrines [2].

La Côte d'Ivoire n'échappe pas à cette réalité : plus de 80 % des populations urbaines ont recours à des dispositifs d'assainissement individuels [3, 4]. Selon l'Office National de l'Assainissement et du Drainage (ONAD), environ 90 % des Ivoiriens dépendent de l'assainissement autonome [5]. Cette situation, conjuguée à l'urbanisation croissante, engendre une production importante de boues de vidange dont la gestion constitue un défi majeur pour les collectivités.

Malgré les volumes générés, les capacités de traitement demeurent insuffisantes et une part significative des boues est encore rejetée dans l'environnement sans traitement adéquat, exposant les populations et les écosystèmes à des risques sanitaires et environnementaux importants [6]. Afin d'améliorer cette situation, l'État ivoirien a mis en place des infrastructures dédiées au traitement des boues de vidange dans le District d'Abidjan, notamment la station d'Anyama-Yapokoi et l'unité compacte de Koumassi-Digue. Ces installations ont pour objectif de favoriser la valorisation agricole des boues à travers leur transformation en compost [7]. Cette stratégie s'inscrit dans une dynamique nationale visant l'extension de ce type d'ouvrages à l'ensemble des régions du pays à l'horizon 2030 [5].

Les composts issus des boues de vidange constituent une source potentielle de matière organique et d'éléments nutritifs essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Leur utilisation peut contribuer à l'amélioration de la fertilité des sols et à la promotion d'une agriculture durable [8]. Cette perspective est par-

ticulièrement intéressante dans le District d'Abidjan, où l'activité maraîchère connaît une forte expansion pour répondre aux besoins alimentaires des populations urbaines.

Cependant, la valorisation agricole de ces composts soulève des préoccupations liées à la présence éventuelle d'éléments traces métalliques (ETM), notamment le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn). Ces contaminants peuvent s'accumuler dans les sols, être absorbés par les cultures et intégrer la chaîne alimentaire, avec des conséquences potentielles sur la santé humaine et l'environnement [9].

Dans ce contexte, il apparaît nécessaire d'évaluer la qualité environnementale et agronomique des composts produits par les stations de traitement des boues de vidange du District d'Abidjan. La présente étude vise ainsi à caractériser les composts issus des installations d'Anyama-Yapokoi et de Koumassi-Digue en déterminant leurs teneurs en plomb, cadmium, cuivre et zinc, ainsi que leurs propriétés agronomiques à travers l'analyse de la granulométrie et des éléments nutritifs. Les résultats permettront d'apprécier leur aptitude à une utilisation agricole durable tout en garantissant la protection de l'environnement et de la santé publique.

2. Matériel et méthodes

2.1. Zone d'étude

Le District Autonome d'Abidjan, créé en 2011, comprend la ville d'Abidjan et s'étend sur quatre sous-préfectures et dix communes. Il compte plus de 6,3 millions d'habitants selon le RGPH 2021 et couvre une superficie de 2 119 km². Bordé par l'océan Atlantique au sud, il est entouré par plusieurs localités telles qu'Agboville, Alépé et Jacqueville. En tant que principal producteur de boues de vidange en Côte d'Ivoire, le District dispose de deux stations de traitement (Anyama-Yapokoi et Koumassi-Digue) et d'un poste de dépotage à Abobo Zoo (Figure 1).

2.1.1. Station de traitement des boues de vidange d'Anyama-Yapokoi

La Station de Traitement des Boues de Vidange (STBV), située à Yapokoi, à 3 km de la ville d'Anyama dans le nord-est du District d'Abidjan, s'étend sur 5 ha et a été mise en service en septembre 2024. Elle traite jusqu'à 300 m³ de boues par jour, répartis sur deux modules de 150 m³ chacun. Le processus de traitement comprend plusieurs étapes : réception, sédimentation, séchage sur lits puis lagunage pour la fraction liquide. Les boues déshydratées sont ensuite hygiénisées pendant 90 jours sur une aire de séchage, puis stockées sous un hangar avant d'être valorisées en agriculture. Entre janvier et avril 2025, plus de 28 400 m³ de boues ont été dépotés à la STBV (Figure 2).

2.1.2. Unité de traitement des boues de vidange de Koumassi-Digue

L'unité compacte de traitement des boues de vidange de Koumassi-Digue est implantée au sein de la station de prétraitement des eaux usées et utilise un procédé basé sur l'ajout de polymères. En 2024, plus de 25 848 m³ de boues y ont été dépotés. Le processus comprend plusieurs étapes : réception, stockage, ajout de polymère, séparation des phases, déshydratation et séchage. La fraction liquide est rejetée dans la station de prétraitement des eaux usées, tandis que la fraction solide est séchée, conditionnée et stockée sous

hangar. Les boues séchées sont ensuite destinées à une valorisation agricole.

2.2. Matériel d'étude

Le matériel d'étude est constitué de la fraction solide (boues déshydratées et séchées) issue du traitement des boues de vidange dans les deux stations.

2.3. Méthodes

2.3.1. Échantillonnage

Les campagnes d'échantillonnage ont été réalisées à la fin de chaque cycle de traitement des boues solides. Pour les boues en cours de séchage, les prélèvements ont eu lieu en plusieurs points (côtés et diagonales) de l'aire de séchage. Pour les boues déjà séchées et ensachées lors du cycle précédent, les échantillons ont été prélevés dans les deux tiers des sacs. Les échantillons collectés à chaque campagne ont été homogénéisés pour constituer un échantillon moyen. Après séchage, les boues sont acheminées à température ambiante au laboratoire, puis broyées et tamisées (maille de 2 à 5 mm) avant analyse (Figures 3 et 4).

Quatre campagnes ont été menées : deux sur le site de Koumassi (11 et 25 avril 2025) et deux à Anyama (29 avril et 22 mai 2025). Chaque campagne est identifiée par un code : KOUM 1 et KOUM 2 pour Koumassi, ANY 1 et ANY 2 pour Anyama.

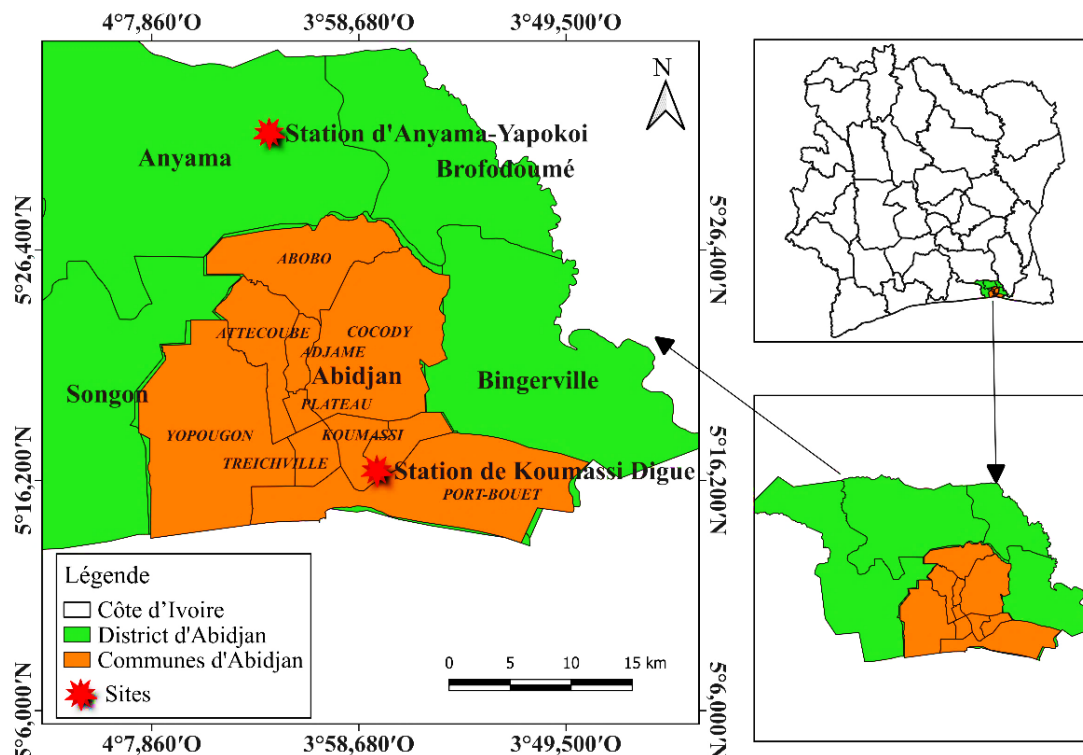


Fig. 1. Localisation des zones d'étude.

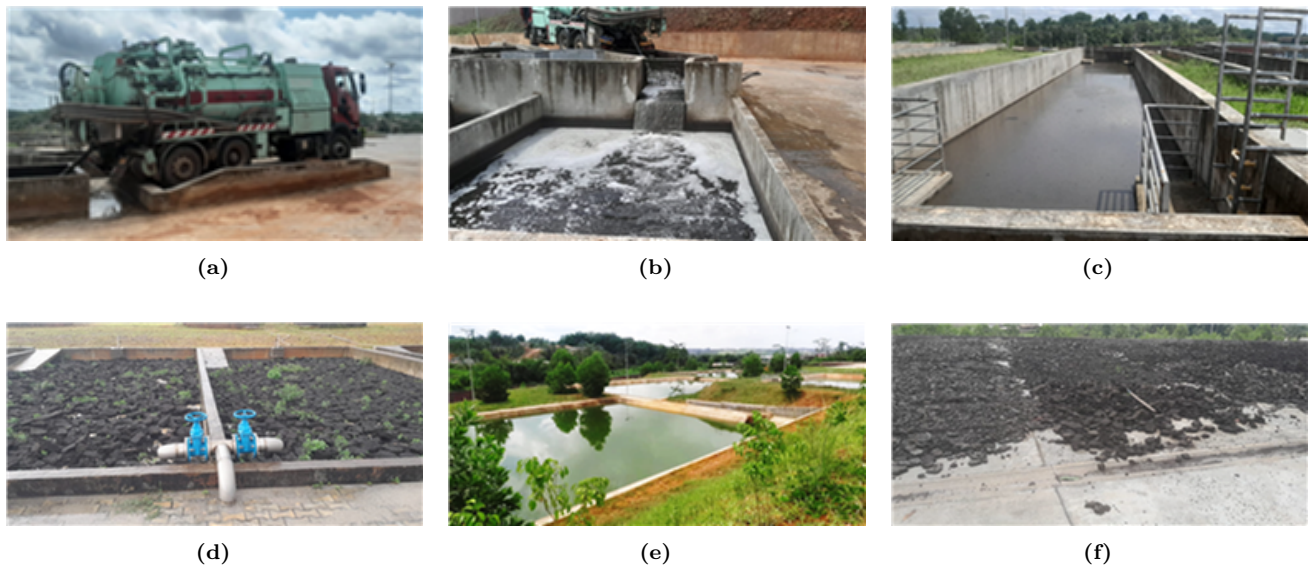


Fig. 2. Étapes du traitement des boues de vidange à la STBV d'Anyama-Yapokoi : a) Véhicule de dépotage ; b) Réception des boues ; c) Bassin de sédimentation ; d) Lits de séchage ; e) Traitement par lagunage ; f) Aire de séchage.

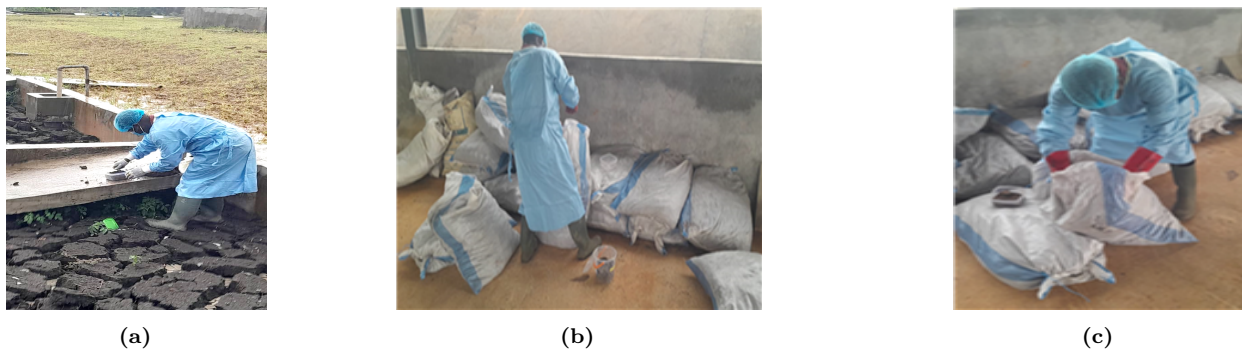


Fig. 3. Prélèvement et conditionnement d'échantillons de boues de vidange : a) Prélèvement de boues sur site ; b) Stockage des échantillons ; c) Conditionnement des échantillons pour analyse.

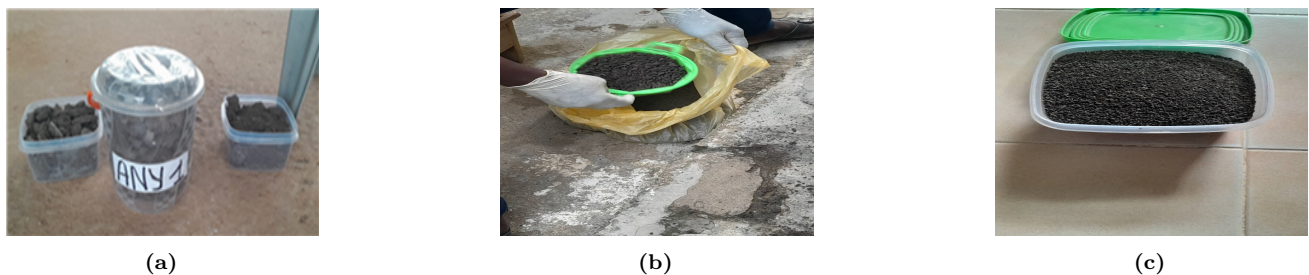


Fig. 4. Préparation des échantillons : a) Échantillons de compost ; b) Tamisage des composts de vidange ; c) Homogénéisation des composts pour analyse.

2.3.2. Méthodes d'analyse des échantillons

L'analyse des échantillons a été réalisée au Laboratoire Central d'Analyse (LCA) de l'Université Nangui Abrogoua et au Laboratoire National d'Appui au Développement Agricole (LANADA). Les échantillons ont fait l'objet d'analyses physiques et chimiques, selon les méthodes développées par le Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (CEAEQ) [10–12], par l'AFNOR [13] et celles décrites par Rodier et al. [14].

L'appareil principal pour les analyses est le spectro-

photomètre d'absorption atomique à flamme présenté à la figure 5.

Dosage des minéraux et des métaux

La méthode de dosage des minéraux et des métaux se déroule en deux grandes étapes : l'extraction et la détermination des teneurs. L'échantillon homogénéisé et séché est d'abord attaqué successivement par de l'acide nitrique (trois étapes), puis oxydé au peroxyde d'hydrogène, avant l'ajout d'acide chlorhydrique pour compléter la digestion. Après refroidissement, la solu-

tion est filtrée, diluée à 50 mL, puis conservée dans un flacon pour analyse. La teneur en phosphore est mesurée par photométrie, puis convertie en mg kg^{-1} à l'aide d'un facteur de conversion. Les métaux (Pb, Cd, Cu, Zn, etc.) sont quantifiés par spectrophotométrie d'absorption atomique. Les résultats sont obtenus en mg L^{-1} , puis convertis en mg kg^{-1} de matière sèche à l'aide d'une formule intégrant la teneur, le volume de la solution, la masse de l'échantillon et le facteur de dilution. Cette méthode suit les protocoles développés par le CEAEQ [10,11] afin de garantir la fiabilité des mesures.

$$C_{(\text{mg kg}^{-1} \text{ MS})} = \frac{C_{(\text{mg L}^{-1})} \times V \times F_d}{m} \quad (1)$$

avec :

- $C_{\text{mg kg}^{-1} \text{ MS}}$: teneur du métal en mg kg^{-1} de matière sèche ;
- $C_{\text{mg L}^{-1}}$: teneur mesurée en solution (mg L^{-1}) ;
- V : volume final de la solution d'extraction (L) ;
- F_d : facteur de dilution (sans unité) ;
- m : masse sèche de l'échantillon digéré (kg).

Conditions instrumentales de dosage des ETM

La validation de la méthode a été réalisée par l'analyse de blancs, de duplicatas et d'échantillons dopés. Les taux de recouvrement obtenus pour les ETM variaient entre 90 et 98 %, ce qui atteste d'une bonne efficacité de la digestion acide. Les teneurs mesurées dans les blancs étaient inférieures aux limites de détection. La précision de la méthode, évaluée par le calcul de l'écart relatif en pourcentage (RPD) entre duplicatas, était inférieure à 15 %, confirmant une bonne répétabilité analytique (Tableau 1).

Granulométrie

La méthode utilisée pour la détermination des fractions granulométriques est la méthode internationale à la pipette de Robinson. Cette analyse permet de connaître la répartition des particules ($< 2 \text{ mm}$) selon la classe de grosseur. Elle est basée sur la destruction de la matière organique par l'eau oxygénée (H_2O_2), une solution dispersante d'hexamétaphosphate de sodium et une solution ammoniacale (NH_4). On effectue ensuite une séparation des fractions fines, limons et argiles par sédimentation, tandis que les fractions grossières, sables grossiers et fins, sont séparées par tamisage. La composition granulométrique est exprimée en pourcentage (%) [15].

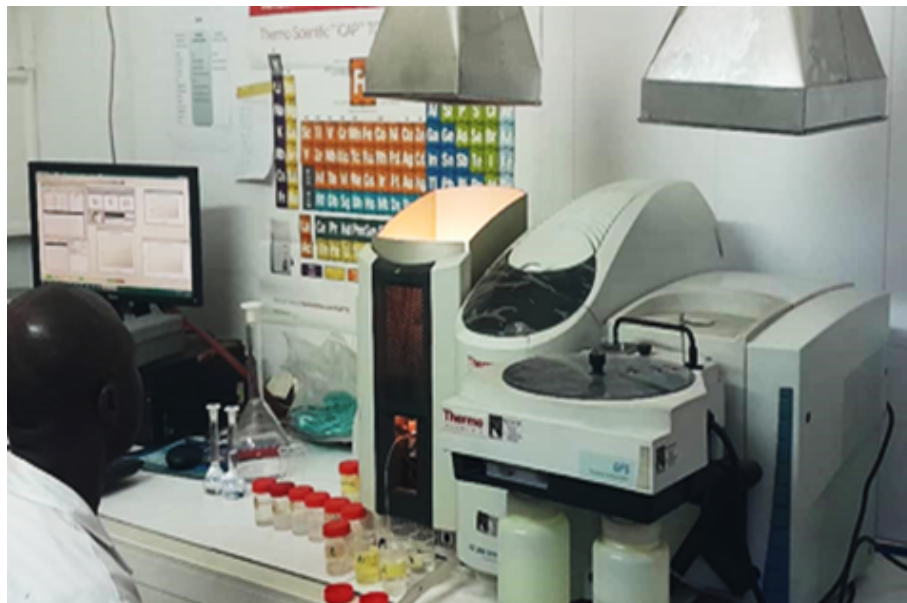


Fig. 5. Spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme.

Tableau 1

Paramètres de validation analytique des ETM par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA).

Élément	LD (mg L^{-1})	LQ (mg L^{-1})	RPD (%)	Recouvrement (%)
Pb	0,01	0,03	7,9	95
Cu	0,01	0,03	6,5	90
Zn	0,01	0,03	6,9	98
Cd	0,001	0,003	6,4	93

LD : Limite de Détection ; LQ : Limite de Quantification ; RPD : Écart relatif en pourcentage.

2.3.3. Analyses statistiques des données

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica (version 7.1). Étant donné le caractère exploratoire de l'étude, une approche descriptive a été privilégiée, reposant sur le calcul des moyennes et des écarts types, les données suivant une distribution normale. Le choix de ne pas recourir à une analyse de variance (ANOVA) se justifie par le faible nombre de répétitions, limité à deux campagnes de mesures par site. Cette contrainte réduit la puissance statistique et ne garantit pas la robustesse des tests inférentiels, rendant les résultats potentiellement peu généralisables. L'analyse descriptive a par conséquent été retenue afin de décrire les tendances observées sans surinterprétation. Des analyses de corrélation (coefficient de Pearson) ont également été effectuées pour évaluer les relations linéaires entre les variables : les valeurs proches de -1 ou 1 indiquent une forte corrélation, tandis qu'une valeur proche de 0 traduit l'absence de lien linéaire. Enfin, les graphiques ont été réalisés à l'aide du logiciel Excel (version 2016).

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats

3.1.1. Éléments traces métalliques (ETM) dans les composts

- **Teneurs en ETM des composts**

Le [tableau 2](#) présente les teneurs en éléments traces métalliques, à savoir le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn), contenues dans les fractions solides dérivées du traitement des boues de vidange dans les stations d'Anyama et de Koumassi.

Les teneurs moyennes en plomb évoluent de $4,24 \text{ mg kg}^{-1}$ pour les échantillons ANY 1 de la station d'Anyama à $25,14 \text{ mg kg}^{-1}$ pour les échantillons KOUM 1 de la station de Koumassi.

Concernant le cadmium, ces teneurs moyennes varient de $0,29$ à $0,57 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivement dans les échantillons KOUM 2 et KOUM 1.

Quant au cuivre, la teneur moyenne obtenue dans les échantillons KOUM 2 ($74,92 \text{ mg kg}^{-1}$) est inférieure à celle enregistrée dans les échantillons ANY 2 ($263,53 \text{ mg kg}^{-1}$).

Pour ce qui est des teneurs moyennes en zinc, celle mesurée dans les échantillons KOUM 1 ($1018,60 \text{ mg kg}^{-1}$) est supérieure à celle observée dans les échantillons KOUM 2 ($476,16 \text{ mg kg}^{-1}$).

Les teneurs en plomb, cadmium et cuivre de tous les échantillons sont bien en dessous des seuils réglementaires français (NF U 44-051) et canadiens (CAN/BNQ 0413-200). En revanche, les teneurs en zinc des échantillons ANY 2 ($797,55 \text{ mg kg}^{-1}$) et KOUM 1 ($1018,60 \text{ mg kg}^{-1}$) sont supérieures aux limites française (600 mg kg^{-1}) et canadienne pour le compost de type A (700 mg kg^{-1}), tout en restant inférieures au seuil de la norme canadienne pour le compost de type B (1850 mg kg^{-1}).

- **Estimation des flux annuels de zinc dans les composts**

Selon Blanchard [18], les apports de compost recommandés se situent entre $4,1$ et $5,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour les sols sableux. Sur la base de ces valeurs, il est possible d'estimer les quantités de zinc apportées au sol par épandage annuel ([Tableau 3](#)).

Tableau 2

Teneurs en éléments traces métalliques des composts par échantillon (mg kg^{-1}).

Paramètre		ANY 1	ANY 2	KOUM 1	KOUM 2	Valeurs limites (mg kg^{-1})		
						NF U 44-051 (AFNOR [17])	CAN/BNQ 0413-200	
							Type A ^a	Type B ^b
Pb	Min	4,12	11,73	24,68	9,63			
	Moy	$4,24 \pm 0,20$	$12,21 \pm 0,45$	$25,14 \pm 0,41$	$9,95 \pm 0,44$	180	120	300
	Max	4,48	12,63	25,45	10,45			
Cd	Min	0,35	0,44	0,54	0,28			
	Moy	$0,36 \pm 0,02$	$0,45 \pm 0,01$	$0,57 \pm 0,02$	$0,29 \pm 0,01$	3	3	20
	Max	0,37	0,46	0,58	0,30			
Cu	Min	102,15	261,24	142,44	74,73			
	Moy	$102,79 \pm 0,56$	$263,53 \pm 2,05$	$143,90 \pm 1,37$	$74,92 \pm 0,16$	300	400	1500
	Max	103,19	265,20	145,16	75,01			
Zn	Min	498,15	797,05	1014,49	475,13			
	Moy	$500,87 \pm 4,03$	$797,55 \pm 0,69$	$1018,60 \pm 6,38$	$476,16 \pm 0,94$	600	700	1850
	Max	505,50	798,34	1025,95	476,97			

^a Le compost de type A est un compost sans restriction d'utilisation, idéal pour les jardins, potagers, pépinières et cultures maraîchères.

^b Le compost de type B est un compost à utilisation restreinte en raison d'une teneur plus élevée en ETM ou de la présence de corps étrangers tranchants ; il peut être utilisé en grandes cultures agricoles.

Tableau 3

Estimation des flux annuels de zinc (Zn).

Échantillon	Zn (mg kg ⁻¹)	Zn (t ha ⁻¹ an ⁻¹)
ANY 1	500,87	2,70
ANY 2	797,55	4,31
KOUM 1	1018,60	5,50
KOUM 2	476,16	2,57
Limite NF U 44-095	600	3,24
CAN/BNQ 0413-200	700	3,78

Le **tableau 3** montre que les apports en Zn issus des composts ANY 2 et KOUM 1 dépassent à la fois la limite NF U 44-051 (3,24 t ha⁻¹ an⁻¹) et la norme CAN/BNQ 0413-200 (3,78 t ha⁻¹ an⁻¹), avec des valeurs respectives de 4,31 et 5,50 t ha⁻¹ an⁻¹. En revanche, les échantillons ANY 1 et KOUM 2 restent en dessous des seuils, traduisant un risque plus faible d'accumulation à court terme.

- **Enrichissement des ETM dans les composts**

Ordre d'abondance des ETM dans les composts

La **figure 6** illustre l'ordre d'abondance des ETM dans l'ensemble des composts. La teneur en zinc est la plus abondante de tous les éléments traces métalliques, la plus faible teneur étant celle du cadmium. Il ressort de l'analyse de cette figure que l'ordre décroissant d'abondance est le suivant : Zn > Cu > Pb > Cd.

Ordre d'enrichissement des stations en ETM

La **figure 7** montre la répartition des teneurs moyennes totales de chaque ETM pour chacune des stations de traitement des boues de vidange. Il ressort de l'analyse de cette figure que les teneurs en cadmium sont sensiblement les mêmes dans les deux stations. En revanche, les teneurs en plomb et en zinc observées dans les échantillons de Koumassi sont supérieures à celles d'Anyama. Quant à la teneur en cuivre, elle est plus élevée dans les composts issus de la station d'Anyama.

De façon globale, les échantillons issus de la station de Koumassi sont plus riches en ETM (**Figure 8**).

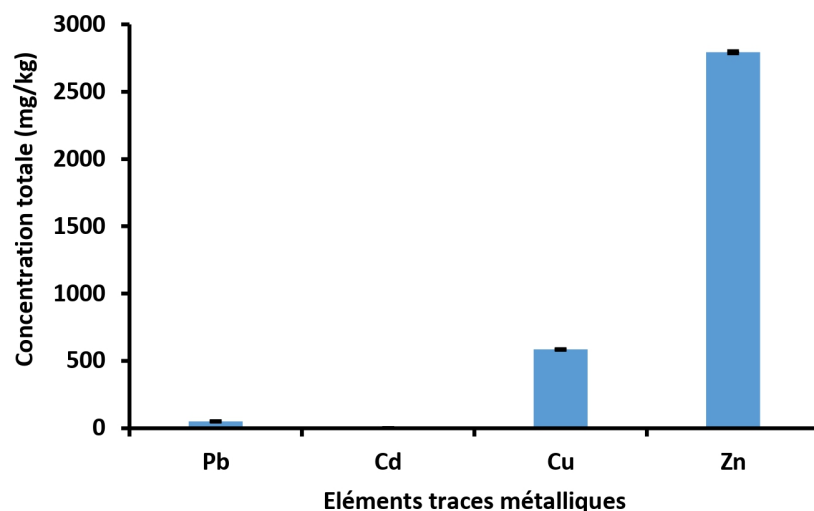


Fig. 6. Teneurs moyennes totales par ETM sur l'ensemble des campagnes d'échantillonnage.

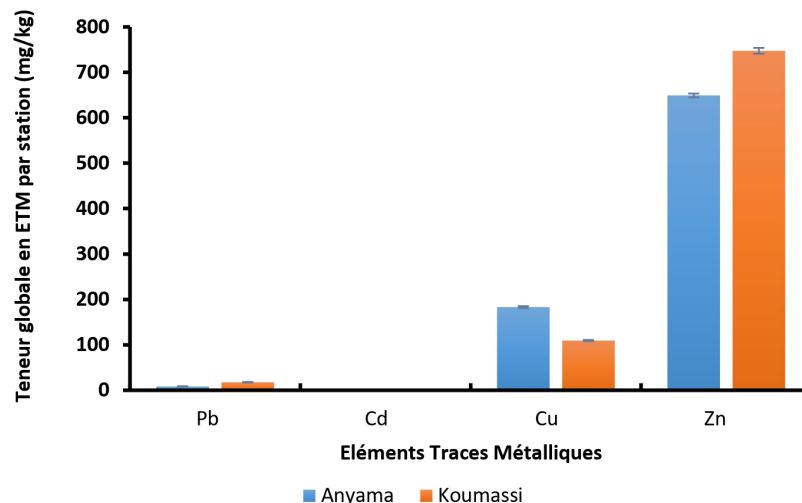


Fig. 7. Teneur globale en éléments traces métalliques par station.

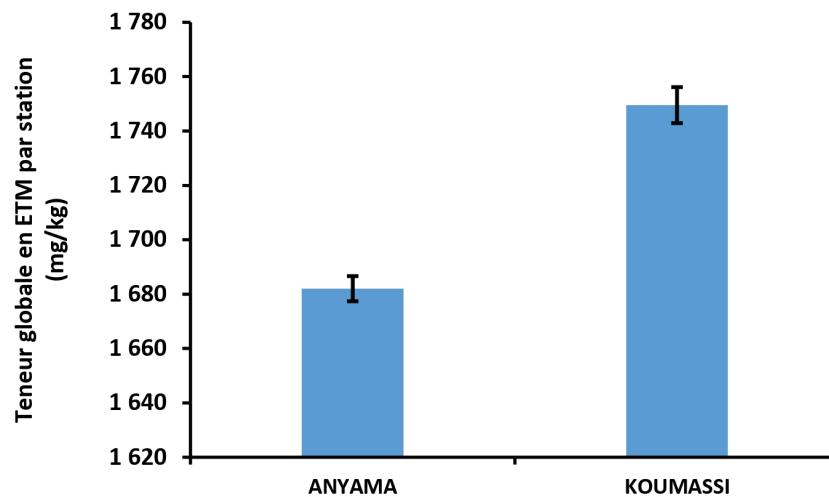


Fig. 8. Enrichissement des stations en ETM.

3.1.2. Détermination des teneurs en nutriments des composts

Les propriétés agronomiques des composts sont évaluées à travers deux volets complémentaires : d'une part, l'analyse des paramètres granulométriques et, d'autre part, la potentialité de fertilisation et de stabilité des composts. Cette capacité a été appréciée à travers les caractéristiques physiques et physico-chimiques, incluant la granulométrie, le pH, la matière sèche (MS), la matière organique (MO), le carbone organique total (COT), le rapport C/N et la teneur en éléments nutritifs (N, K, Mg, Ca et Na).

• Caractéristiques physiques et physico-chimiques des composts

Composition granulométrique des composts

Les fractions granulométriques, présentées à la figure 9, révèlent une prédominance des particules grossières ($> 500 \mu\text{m}$) sur les deux sites étudiés, représentant en moyenne 72 % des échantillons. La fraction de sable moyen ($250 - 500 \mu\text{m}$) reste relativement constante dans l'ensemble des échantillons, avec une moyenne avoisinant 12 % sur les deux sites. En revanche, les fractions de sable fin ($125 - 250 \mu\text{m}$) et de sable très fin ($\leq 125 \mu\text{m}$) sont peu représentées, avec des moyennes respectives de 9 % et 6 %.

Caractéristiques physico-chimiques des composts (pH, MS, MO, COT et rapport C/N)

Le tableau 4 présente les caractéristiques physico-chimiques des composts issus des différentes stations, à savoir le pH, la matière sèche (MS), la matière organique (MO), le carbone organique total (COT) et le rapport carbone/azote (C/N). Le pH moyen est respectivement de 6,34, 7,18, 6,36 et 5,30 pour les échantillons ANY 1, ANY 2, KOUM 1 et KOUM 2, traduisant des produits légèrement acides à neutres. Seul celui de KOUM 2 (pH 5,30) se situe en dehors de l'intervalle recommandé (5,5–8,5), soit en dessous de la valeur

minimale.

Concernant les teneurs moyennes de matière sèche, elles varient de 56,22 % à 81,99 %, respectivement pour les échantillons KOUM 2 et ANY 2. La teneur en MS de l'échantillon KOUM 2 est inférieure à la valeur minimale recommandée.

Quant à la matière organique, les teneurs de MO varient de 49,47 % à 57,18 %, et celles du COT oscillent entre 24,73 % et 28,59 %, respectivement pour les échantillons KOUM 2 et KOUM 1.

Le rapport C/N évolue de 13,65 dans l'échantillon KOUM 1 à 19,10 dans l'échantillon KOUM 2. Tous les échantillons présentent un rapport C/N compris dans l'intervalle idéal pour une bonne minéralisation de la matière organique (12 à 15), à l'exception de l'échantillon KOUM 2, dont la valeur est supérieure.

Teneurs en nutriments des composts

Le tableau 5 montre la variation des teneurs moyennes en nutriments des composts issus des boues de vidange.

Les teneurs moyennes d'azote total évoluent de 1,30 % dans les échantillons KOUM 2 à 2,10 % dans les échantillons KOUM 1.

Quant au phosphore total, sa teneur varie de 0,16 % dans les échantillons ANY 2 à 0,69 % dans les échantillons ANY 1. À l'exception des échantillons ANY 1, les autres échantillons présentent des teneurs légèrement inférieures au seuil minimal.

Pour ce qui est des teneurs moyennes de potassium, elles oscillent entre 0,02 % pour les échantillons ANY 2 et 0,05 % pour les échantillons ANY 1 et KOUM 1. Ces valeurs restent inférieures aux valeurs réglementaires.

En ce qui concerne le calcium, les valeurs varient de 0,32 % pour les échantillons KOUM 2 à 0,59 % pour les échantillons ANY 2.

Quant aux teneurs moyennes de magnésium et de sodium, elles varient respectivement de 0,08 %

dans les échantillons ANY 1 à 0,13 % dans les échantillons KOUM 1, et de 0,01 % dans les échantillons ANY 2 à 0,06 % dans les échantillons ANY 1.

• **Relation entre les paramètres métalliques et les paramètres physico-chimiques des composts**

L'analyse du [tableau 6](#) révèle de nombreuses relations entre les paramètres. Les relations majeures qui se dégagent sont celles observées entre les ETM eux-mêmes (i), entre les ETM et les paramètres agronomiques (ii), et entre les paramètres physico-chimiques eux-mêmes (iii).

Corrélation entre ETM (i)

L'analyse du [tableau 6](#) révèle une forte corrélation positive entre le plomb et le cadmium ($r = 0,85$), ainsi qu'entre le plomb et le zinc ($r = 0,91$). Par ailleurs, une corrélation positive très élevée est également observée entre le zinc et le cadmium ($r = 0,96$).

Corrélation entre ETM et paramètres physico-chimiques (ii)

Il ressort du [tableau 6](#) que le plomb est fortement

corrélé positivement à la MO et au Mg ($r > 0,75$). Concernant le cadmium, une forte interdépendance est observée avec la MO, la MS, l'azote, le calcium et le magnésium ($r > 0,73$). Quant au cuivre, il présente une forte corrélation positive avec le pH, la MO et le calcium ($r > 0,76$), ainsi qu'une forte corrélation négative avec le phosphore et le sodium ($r < -0,73$). Le zinc présente une forte affinité avec la MO, l'azote, le calcium et le magnésium ($r > 0,79$).

Corrélation entre paramètres physico-chimiques (iii)

Il ressort également du [tableau 6](#) que l'azote est fortement corrélé positivement au calcium, au magnésium, au pH, à la MS, à la MO et au COT ($r > 0,80$), et négativement corrélé au rapport C/N ($r = -0,94$). Le potassium, quant à lui, est fortement corrélé positivement au phosphore et au sodium ($r > 0,84$). Le calcium est positivement corrélé au pH, à la MO et au COT ($r > 0,84$) et négativement corrélé au phosphore ($r < -0,76$). La MO est négativement corrélée au phosphore ($r = -0,63$) et positivement corrélée au magnésium ($r = 0,78$). Le pH, enfin, est positivement lié à la MS ($r = 0,90$) et à la MO ($r = 0,70$).

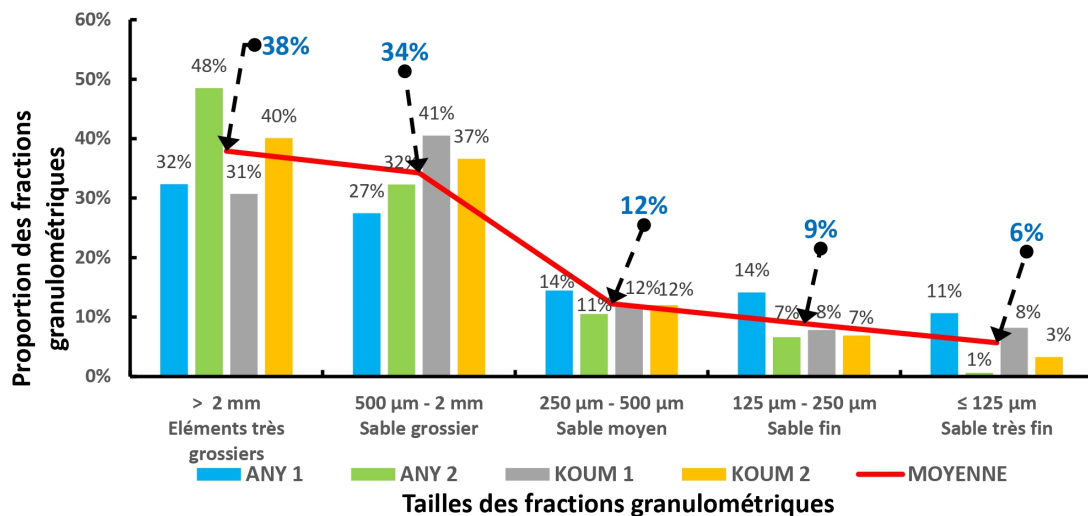


Fig. 9. Composition granulométrique des composts (classification de Friedman [18]).

Tableau 4

Caractéristiques physico-chimiques des composts.

Paramètre	ANY 1	ANY 2	KOUM 1	KOUM 2	ADEME [18] ; Bernal <i>et al.</i> [19]
pH	6,34 ± 0,02	7,18 ± 0,05	6,36 ± 0,05	5,30 ± 0,02	5,5–8,5
MS (%)	78,43 ± 0,75	81,99 ± 0,16	81,05 ± 0,21	56,22 ± 1,10	≥ 70
MO (%)	49,98 ± 1,41	56,75 ± 0,39	57,18 ± 0,19	49,47 ± 1,05	40–65
COT (%)	24,99 ± 0,70	28,37 ± 0,20	28,59 ± 0,10	24,73 ± 0,52	–
C/N	14,61 ± 0,41	14,55 ± 0,10	13,65 ± 0,05	19,10 ± 0,40	12–15

Tableau 5

Teneurs en nutriments des composts.

Paramètre	ANY 1	ANY 2	KOUM 1	KOUM 2	ADEME [18]; Bernal <i>et al.</i> [19]
N (%)	1,71 ± 0,01	1,95 ± 0,02	2,10 ± 0,01	1,30 ± 0,01	1,5–2,5
P (%)	0,69 ± 0,02	0,16 ± 0,0001	0,41 ± 0,01	0,40 ± 0,01	0,43–0,47
K (%)	0,05 ± 0,0001	0,02 ± 0,0001	0,05 ± 0,0001	0,03 ± 0,001	0,08–0,42
Ca (%)	0,34 ± 0,01	0,59 ± 0,01	0,50 ± 0,001	0,32 ± 0,001	–
Mg (%)	0,08 ± 0,0001	0,10 ± 0,001	0,13 ± 0,001	0,09 ± 0,001	–
Na (%)	0,06 ± 0,0001	0,01 ± 0,001	0,05 ± 0,001	0,03 ± 0,001	–

Tableau 6

Matrice de corrélation de Pearson entre les paramètres métalliques et les paramètres agronomiques.

	pH	MS	MO	COT	C/N	N	P	K	Ca	Mg	Na	Pb	Cd	Cu	Zn
pH	1														
MS	0,897	1													
MO	0,702	0,685	1												
COT	0,702	0,685	1,000	1											
C/N	–0,801	–0,979	–0,650	–0,650	1										
N	0,801	0,928	0,869	0,869	–0,937	1									
P	–0,390	–0,072	–0,627	–0,627	–0,030	–0,248	1								
K	–0,277	0,159	–0,216	–0,216	–0,316	0,142	0,848	1							
Ca	0,839	0,691	0,918	0,918	–0,615	0,794	–0,761	–0,478	1						
Mg	0,246	0,455	0,784	0,784	–0,548	0,743	–0,284	0,261	0,550	1					
Na	–0,392	0,027	–0,364	–0,364	–0,180	–0,013	0,908	0,987	–0,611	0,125	1				
Pb	0,129	0,291	0,754	0,754	–0,380	0,623	–0,388	0,146	0,522	0,978	0,024	1			
Cd	0,571	0,742	0,887	0,887	–0,793	0,932	–0,310	0,185	0,733	0,919	0,029	0,850	1		
Cu	0,898	0,653	0,762	0,762	–0,528	0,651	–0,749	–0,634	0,943	0,247	–0,737	0,216	0,502	1	
Zn	0,533	0,645	0,931	0,931	–0,685	0,881	–0,464	0,045	0,787	0,944	–0,109	0,906	0,976	0,547	1

3.2. Discussion

3.2.1. Teneurs en éléments traces métalliques des composts issus des boues de vidange

Les teneurs en éléments traces métalliques (ETM) des composts issus des boues de vidange, présentées dans le [tableau 2](#), révèlent des niveaux variables selon les sites d'origine (Anyama et Koumassi) et les échantillons prélevés (ANY 1, ANY 2, KOUM 1 et KOUM 2). Les métaux, à savoir le plomb (Pb), le cadmium (Cd) et le cuivre (Cu), présentent des teneurs inférieures aux valeurs limites définies par les normes NF U 44-051 et CAN/BNQ 0413-200 [17].

Ces faibles teneurs en ETM indiqueraient un risque de toxicité limité pour les plantes et les sols selon Dumat *et al.* [20]. Elles seraient en partie liées à la provenance de ces boues, généralement issues de zones d'habitation résidentielles peu industrialisées (Kengne *et al.* [21]), ainsi qu'aux pertes de métaux survenant pendant le traitement des boues de vidange, au cours duquel certains métaux peuvent être lixiviés ou immobilisés dans les fractions fines (Zhou *et al.* [22]).

Contrairement aux autres ETM étudiés, le zinc présente les teneurs les plus élevées, atteignant jusqu'à 1018,6 mg kg^{–1} dans les échantillons KOUM 1. Ces teneurs dépassent les seuils fixés par la norme française (600 mg kg^{–1}) et la norme canadienne pour les composts de type A (700 mg kg^{–1}), tout en demeurant inférieures à la limite autorisée pour les composts de

type B (1850 mg kg^{–1}). Cette situation pourrait s'expliquer par une accumulation naturelle du zinc dans les boues issues des eaux usées urbaines, phénomène également observé par Miras-Avalos *et al.* [23].

Les résultats du Pb et du Cd sont proches de ceux obtenus par Ouédraogo [24] sur des boues de vidange séchées, avec respectivement des teneurs de 8,49 et 0,64 mg kg^{–1}. Sonko *et al.* [25] et Kengne *et al.* [21] ont rapporté des teneurs en zinc de 784,8 mg kg^{–1} et 703 mg kg^{–1}, proches de celle mesurée dans les échantillons ANY 2 (797,55 mg kg^{–1}).

Les apports annuels en Zn issus des composts ANY 2 et KOUM 1 dépassent les seuils normatifs (NF U 44-051 et CAN/BNQ 0413-200), indiquant un apport de zinc supérieur aux pratiques agricoles courantes. Dans les sols agricoles non contaminés, les teneurs totales en Zn sont généralement faibles (10–100 mg kg^{–1}), avec des flux naturels bien inférieurs aux apports des composts riches en Zn (Noulas *et al.* [26]). À Bobo-Dioulasso, l'épandage de déchets organiques a montré une augmentation significative du Zn du sol, de 15,16 à 63,92 mg kg^{–1} selon les doses appliquées, soulignant l'impact des intrants organiques sur les systèmes agricoles et périurbains régionaux (Senou *et al.* [27]). Ces résultats suggèrent que les composts étudiés correspondent à des scénarios d'amendements intensifs, nécessitant un suivi rigoureux pour prévenir l'accumulation des ETM à long terme. L'ordre d'enrichissement des ETM dans les composts (Zn > Cu > Pb > Cd) est ca-

ractéristique des boues de vidange urbaines, confirmant les observations classiques rapportées par plusieurs auteurs, dont Gupta *et al.* [28]. Le zinc apparaît ainsi comme l'ETM le plus concentré, ce qui pourrait poser des questions pour un usage agricole prolongé, même si les valeurs restent conformes aux normes.

De façon générale, la teneur globale en ETM observée dans les échantillons de Koumassi ($1749,53 \text{ mg kg}^{-1}$) est supérieure à celle enregistrée dans les échantillons d'Anyama (1682 mg kg^{-1}). Cette différence pourrait s'expliquer par des variations dans la composition des boues initiales ou par des différences dans les conditions ou les procédés de compostage, notamment l'utilisation de polymères lors du traitement des boues de vidange, comme le suggèrent les travaux de Wang *et al.* [29].

3.2.2. Propriétés agronomiques des composts et stabilisation des ETM

L'analyse granulométrique des composts produits à partir de boues de vidange, illustrée par la figure 8, a montré une proportion de 38 % pour les fractions de taille supérieure à 2 mm. Ce résultat indique une texture relativement grossière du compost, favorable à l'aération du sol mais pouvant limiter la rétention d'eau [30]. Par ailleurs, la proportion des particules de taille inférieure à 2 mm représente 62 %, avec une présence moyenne de 9 % de particules fines ($125 - 250 \mu\text{m}$) et de 6 % de particules très fines ($\leq 125 \mu\text{m}$). Ces fractions fines ($\leq 250 \mu\text{m}$), bien que plus faibles, contribueraient à la stabilité structurale. Des résultats similaires ont été rapportés par Abdou *et al.* [31], qui ont observé entre 65 et 70 % de particules de moins de 2 mm dans leurs composts. Selon ces auteurs, cette situation pourrait s'expliquer par un tamisage trop grossier ou par une maturation incomplète du compost. De même, Compaoré *et al.* [32] ont observé qu'environ 65 % des fractions étaient inférieures ou égales à 2 mm, ce qui les a conduits à conclure que la texture de ces composts se rapproche de celle d'un sol.

Sur le plan physico-chimique, les composts présentent des pH globalement compris dans la fourchette recommandée (5,5 à 8,5), à l'exception de l'échantillon KOUM 2, dont le pH est inférieur à 5,5. Des pH similaires ont été obtenus par Lo *et al.* [33] sur sept co-composts à base de boues de vidange, avec des valeurs allant de 6,3 à 6,6. Les taux de matière sèche (MS) sont généralement satisfaisants ($\text{MS} \geq 70 \%$), indiquant un bon séchage de ces biosolides, sauf pour les échantillons KOUM 2 (56,22 % de MS). Ce résultat pourrait témoigner d'un séchage insuffisant ou d'une immaturité relative de ce compost. En effet, une boue semi-sèche peut permettre la poursuite de l'activité microbienne anaérobie et la formation continue d'acides organiques. Le taux de $\text{MS} < 70 \%$ aurait ainsi contribué à la baisse du pH observée pour les échantillons KOUM 2 [21]. Concernant les proportions de matière organique (MO), les composts présentent des teneurs élevées, comprises entre 49,47 % et 57,18 %, ce qui constituerait un avantage important pour améliorer la fertilité des sols appauvris [34]. Le rapport carbone/azote (C/N) varie de 13,65 à 19,10. Les échantillons provenant d'Anyama

affichent des valeurs proches de l'optimum (12 à 15), indiquant une bonne minéralisation de la matière organique et une stabilité satisfaisante du compost [35]. Cette maturité favorise la transformation progressive des fractions métalliques échangeables en fractions plus stables, liées à la matière organique humifiée ou aux phases minérales. En revanche, la valeur plus élevée observée pour les échantillons KOUM 2 pourrait ralentir la minéralisation de l'azote et présenter une fraction métallique plus mobile. Xiong *et al.* [36] et Abdou *et al.* [31] ont rapporté des valeurs de 13,67 et 15,14 pour le rapport C/N dans des composts produits à Madaoua, au Niger. Par ailleurs, Dridi et Zerrouk [37] ont trouvé des taux de 88,7 % de MS et 56,4 % de MO dans des boues séchées en Algérie, comparables à ceux observés dans cette étude. Globalement, bien que les teneurs totales en Pb, Cd et Cu soient inférieures aux valeurs seuils réglementaires et que le zinc ne dépasse que les normes les plus strictes sans excéder les limites d'un usage agricole restreint, les mécanismes physico-chimiques observés indiquent une stabilisation majoritairement organo-minérale des ETM (Wang *et al.* [38]).

Les teneurs en nutriments ont montré des niveaux intéressants d'azote (N), compris entre 1,30 et 2,10 %, indiquant un potentiel fertilisant important. Ces valeurs sont proches des résultats de Lo *et al.* [33], qui ont rapporté des teneurs en azote variant de 1,30 % à 2,20 % dans sept composts. En ce qui concerne le phosphore (P), les teneurs oscillent entre 0,16 % et 0,69 %, tandis que celles du potassium (K) se situent entre 0,02 % et 0,05 %, ce qui reste globalement faible. Cela suggère que ces composts conviendraient davantage à un usage comme amendement organique qu'à une fonction de fertilisant principal (Guivarch [39]). Les teneurs en potassium sont comparables à celles rapportées par Sonko *et al.* [25] et Kengne *et al.* [21], qui ont respectivement trouvé 0,018 % et 0,03 %. Les niveaux de phosphore obtenus sont également proches de ceux de Lo *et al.* [33], compris entre 0,2 % et 0,5 %.

3.2.3. Mécanismes d'interaction ETM-matière organique et influence du pH sur la mobilité des métaux

Les très fortes corrélations entre le zinc et le plomb ($r = 0,91$), le zinc et le cadmium ($r = 0,98$), ainsi qu'entre le plomb et le cadmium ($r = 0,85$), pourraient indiquer une origine commune pour ces ETM, probablement liée aux effluents domestiques, aux produits ménagers ou à certaines contributions anthropiques urbaines. Il est également possible que ces ETM soient transportés conjointement par la matière organique (MO) du compost (Compaoré *et al.* [32]), ce qui expliquerait les fortes corrélations observées entre les ETM et la MO, en particulier pour le zinc ($r = 0,93$), le cadmium ($r = 0,88$), le plomb ($r = 0,75$) et le cuivre ($r = 0,76$). La corrélation très marquée entre le zinc et la MO pourrait s'expliquer par plusieurs mécanismes physico-chimiques complémentaires, à savoir la complexation du zinc avec la matière organique, son adsorption sur les particules fines, ainsi que sa co-précipitation avec le

calcium (Ca) et le magnésium (Mg).

En effet, la complexation correspond à la formation de liaisons entre les ions Zn^{2+} et les groupements fonctionnels (carboxyles, phénoliques, amines) présents dans la matière organique, notamment les acides humiques et fulviques. Ces interactions conduisent à la formation de complexes organo-métalliques plus ou moins stables, favorisant la rétention du zinc dans le sol tout en modulant sa mobilité et sa biodisponibilité (Sparks [40]; Zhong *et al.* [41]).

Par ailleurs, le zinc peut être adsorbé à la surface des particules fines des composts, telles que les argiles et les oxydes de fer et d'aluminium, qui présentent une surface spécifique élevée et des charges électriques favorables à la fixation des cations métalliques. Ce mécanisme contribue à l'immobilisation partielle du zinc, bien qu'il reste sensible aux variations des conditions du milieu (pH, force ionique) (Alloway [42]).

Enfin, la co-précipitation du zinc avec le calcium et le magnésium intervient principalement en conditions alcalines, caractérisées par la formation de carbonates ($CaCO_3$, $MgCO_3$) et d'hydroxydes. Dans le cadre de cette étude, le zinc présent dans les échantillons à pH légèrement alcalin peut être soit incorporé dans la structure cristalline des minéraux contenant les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , soit piégé lors de leur formation. Ce processus conduit à une immobilisation durable du zinc et à une diminution significative de sa biodisponibilité (Kabata-Pendias et Pendias [43]).

De manière complémentaire, Xiong *et al.* [36] soulignent que la maturation du compost conduit à une redistribution des métaux vers des fractions résiduelles ou fortement liées à la matière organique, diminuant ainsi leur toxicité environnementale. Les fortes corrélations observées entre les ETM et la matière organique dans cette étude confirment ce rôle central de la fraction organique en tant que principal compartiment de rétention.

Le pH apparaît comme un facteur déterminant dans le contrôle de la mobilité métallique. Selon Xiong *et al.* [36], le pH est le principal facteur déterminant la lixiviation des ETM, une augmentation du pH réduisant les teneurs en ETM solubles et, partant, leur biodisponibilité. Dans les composts étudiés, il varie de 5,30 à 7,18, traduisant des milieux légèrement acides à neutres. Les composts présentant un pH proche de la neutralité devraient théoriquement favoriser une meilleure immobilisation des ETM, tandis que les échantillons plus acides pourraient présenter une fraction plus mobile. Cette observation est cohérente avec les mécanismes décrits par Guivarch [39], qui indiquent que la stabilité des complexes organo-métalliques dépend fortement des conditions de pH et du degré de maturité du compost. Par ailleurs, l'étude de Wang *et al.* [38] montre que l'ajout d'amendements tels que le biochar ou la chaux améliore significativement l'immobilisation des ETM via l'augmentation du pH, l'accroissement de la surface spécifique et la formation de complexes organo-minéraux plus stables.

4. Conclusion

Le compostage est une technologie couramment utilisée pour l'élimination et la valorisation des déchets organiques. Cette technologie a été employée pour valoriser les boues de vidange du District d'Abidjan. L'objectif de cette étude était d'évaluer la qualité des composts issus des stations de traitement des boues de vidange d'Anyama-Yapokoi et de Koumassi-Digue, en déterminant à la fois la présence d'éléments traces métalliques et leurs propriétés agronomiques. Les résultats obtenus indiquent que ces composts présentent des caractéristiques agronomiques favorables, notamment des teneurs élevées en matière organique, en carbone organique total et en azote, ainsi qu'un pH légèrement acide à neutre. Ces paramètres confèrent au compost un potentiel significatif pour l'amélioration de la fertilité des sols, en agissant positivement sur leur structure, leur capacité de rétention en eau et la disponibilité progressive des nutriments. Toutefois, la présence de teneurs relativement élevées en zinc dans certains échantillons (KOUM 1 et ANY 2) met en évidence des contraintes potentielles d'ordre environnemental. Ces résultats soulignent la nécessité d'un encadrement strict des pratiques d'épandage, reposant sur un suivi régulier des ETM et sur le respect de conditions favorables à leur stabilisation, notamment un pH adéquat et une maturation complète du compost. Le recours à des stratégies d'optimisation telles que le co-compostage avec des amendements stabilisants (biochar, chaux) pourrait améliorer la qualité du produit final et limiter la biodisponibilité des métaux. Néanmoins, l'absence d'indices de pollution, tels que le facteur d'enrichissement et l'indice de géoaccumulation, ainsi que le manque de suivi pluriannuel, constituent des limites importantes, restreignant l'évaluation des risques à long terme. Cette étude représente ainsi une première étape, centrée sur la détermination des teneurs en éléments traces métalliques et sur la caractérisation agronomique des composts produits. Des travaux futurs devront élargir cette approche en intégrant des indices de pollution, des analyses microbiologiques, des tests de phytotoxicité, ainsi que l'évaluation de la biodisponibilité des métaux et la modélisation de leur devenir dans les sols. Ils devront également s'appuyer sur des analyses statistiques plus robustes, incluant des tests inférentiels tels que l'ANOVA, complétés par des tests post hoc. Une telle démarche permettra de renforcer la solidité scientifique des résultats et de soutenir une valorisation sécurisée et durable des boues de vidange, en cohérence avec les principes de l'économie circulaire.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Office National de l'Assainissement et du Drainage (ONAD) pour avoir autorisé l'accès aux différentes stations de traitement des boues de vidange et permis d'y effectuer les prélèvements nécessaires à cette étude.

Utilisation de l'IA

Au cours de ce travail, l'outil d'intelligence artificielle générative, en l'occurrence ChatGPT, a été utilisé

afin d'améliorer la qualité rédactionnelle et la clarté linguistique du manuscrit

Références

- [1] Organisation Mondiale de la Santé, UNICEF, Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022 : special focus on inequalities, OMS/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP), Genève, New York (2023).
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240076921>
- [2] E. Le Bris, Inscrire la question de l'assainissement et des déchets dans une problématique urbaine, Gestion durable des déchets et de l'assainissement urbain, pS-Eau, PDM, Paris (2005) 85–101.
<http://www.pseau.org/epa/gdda>
- [3] ONAD, Assainissement de la ville de Yamoussoukro, Rapport d'assainissement Yamoussoukro, Côte d'Ivoire (2015).
<https://www.onad.ci>
- [4] D.A. Alla, B. Kambire, A.F. Ossey, *Impact du débordement des fosses septiques sur le cadre de vie et la santé des populations de Yopougon-Andokoi (Abidjan-Côte d'Ivoire)*, Rev. Espaces Territ. Sociétés Santé 1(1) (2018) 30–45.
https://retssa-ci.com/detail_article/19/1
- [5] ONAD, Promotion de l'Accès aux Services d'Assainissement Autonome en milieu Urbain (PASAAU), Abidjan, Côte d'Ivoire (2024).
<https://www.onad.ci>
- [6] L.T.A. Tra, K. Dongo, V.P. Colombo, S. Singh, J. Chenal, *Environmental and socio-economic determinants of fecal sludge emptying in Sub-Saharan Africa : a cross-sectional mixed-methods study in Abidjan, Côte d'Ivoire*, Environ. Sci. Pollut. Res. 31 (2024) 66497–66511.
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-35631-6>
- [7] ONAD, Clôture du 21^e congrès international et exposition de l'Association Africaine de l'Eau (AAE) couplée à la 7^e conférence internationale sur la gestion des boues de vidange (FSMA), Portail officiel du Gouvernement de Côte d'Ivoire (2023).
<https://www.gouv.ci/>
- [8] D. Koné, M. Strauss, Low-cost options for treating faecal sludges (FS) in developing countries, EAWAG/SANDEC (2004) 1–7.
https://www.susana.org/_resources/documents/default/2-404-kone-strauss-2004-fs-treatment-sandec-short-en.pdf
- [9] F. Samake, A.H. Babana, F.K. Yaro, D. Cisse, I. Traore, F. Kante, O. Toure, *Risques sanitaires liés à la consommation des produits maraîchers cultivés dans la zone urbaine et périurbaine de Bamako*, Mali Santé Publ. (2011) 27–31.
<https://doi.org/10.53318/msp.v1i01.133>
- [10] CEAEQ, Détermination du pH : méthode électrométrique, méthode d'analyse MA. 100 – pH 1.1, révision 6, Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (2023).
<https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/methode-analyse-100-ph.pdf>
- [11] CEAEQ, Détermination des métaux : méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon, méthode d'analyse MA. 200 – Mét. 1.2, révision 9, Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (2023).
<https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/methode-analyse-200-metiaux.pdf>
- [12] CEAEQ, Détermination des solides totaux et des solides totaux volatils : méthode gravimétrique, méthode d'analyse MA. 100 – S.T. 1.1, révision 7, Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec (2024).
<https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/methode-analyse-100-solides-totaux.pdf>
- [13] AFNOR, Détermination de l'azote total – méthode Kjeldahl (NF EN 13342), AFNOR (2001).
<https://www.afnor.org/>
- [14] J. Rodier, B. Legube, N. Merlet, L'analyse de l'eau, 9^e éd., Dunod, Paris (2009).
<https://www.dunod.com/>
- [15] D. Baize, Guide des analyses courantes en pédologie, INRA, Paris (1988).
<https://www.inrae.fr>
- [16] M. Blanchard, K. Coulibaly, S. Bognini, P. Dugué, E. Vall, *Diversity in the quality of organic manure produced on farms in West Africa : what impact on recommendations for the use of manure ?*, Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 18(4) (2014) 512–523.
<https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=11654>
- [17] AFNOR, Fertilisants – Compost (NF U 44-051), AFNOR (2018).
<https://www.afnor.org/>
- [18] ADEME, Compostage des déchets : guide méthodologique et retours d'expérience, Agence de la Transition Écologique (2019).
<https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/3575-compostage-des-dechets.html>
- [19] M.P. Bernal, J.A. Albuquerque, R. Moral, *Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment*, Bioresour. Technol. 100(22) (2009) 5444–5453.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- [20] C. Dumat, K. Quenea, A. Bermond, S. Toinen, M.F. Benedetti, *Comportement des éléments traces métalliques dans les sols amendés par des composts : mobilité, biodisponibilité et impacts environnementaux*, Environ. Risques Santé 4(2) (2005) 93–102.
<https://doi.org/10.1051/rst:2005017>
- [21] I.M. Kengne, A. Akoa, D. Koné, *Recovery of bio-solids from constructed wetlands used for faecal*

- sludge dewatering in tropical regions, *Environ. Sci. Technol.* 43(17) (2009) 6816–6821.
<https://doi.org/10.1021/es803279y>
- [22] Y. Zhou, A. Selvam, J.W.C. Wong, *Evaluation of humic substances during co-composting of food waste and sawdust and their role in heavy metal (Cu and Zn) immobilization*, *Chemosphere* 181 (2017) 484–490.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.046>
- [23] J.M. Miras-Avalos, J. Antelo-Campos, M.C. Villar, M. Díaz-Raviña, S.J. González-Prieto, *Proposing policy changes for sewage sludge applications based on zinc within a circular economy perspective*, *Land Use Policy* 70 (2018) 398–406.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.01.005>
- [24] B. Ouédraogo, *Caractérisation des boues de vidange séchées et du percolat traité de la station de traitement de Zagtoui en vue d'une valorisation agronomique*, Mémoire de Master (2016).
<https://doi.org/10.1007/s10653-024-02081-5>
- [25] M. Sonko, D. Cheikh, M. Mbaye, N. Seydou, S. Alasane, G. Amadou, L. Strande, *Qualités agronomique et sanitaire de biosolides produits à partir de lits de séchage plantés à flux vertical*, *J. Sci. Technol.* 10(2) (2014) 9–18.
<https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i6.38>
- [26] C. Noulas, M. Tziouvalekas, T. Karyotis, *Zinc dans les sols, l'eau et les cultures vivrières*, *J. Oligo-Élém. Méd. Biol.* 49(3) (2018) 252–260.
<https://doi.org/10.1007/s12011-018-1383-3>
- [27] I. Senou, H. Ouedraogo, H.B. Nacro, A.N. Some, *Effect of increasing doses of waste on the bioaccumulation of trace metal elements (TME) by Zea mays L. in Bobo Dioulasso (Burkina Faso)*, *Int. J. Agron. Agric. Res.* 22(3) (2023) 1–9.
<https://innspub.net/effect-of-increasing-doses-of-waste-on-the-bioaccumulation-of-trace-metal-elements-tme-by-zea-mays-l-in-bobo-dioulasso-burkina-faso/>
- [28] R. Gupta, S. Kumar, P. Singh, *Trace metal dynamics in sewage sludge composting*, *J. Environ. Manage.* 190 (2017) 123–130.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.056>
- [29] H.-F. Wang, H.-J. Wang, H. Hu, R.J. Zeng, *Applying rheological analysis to understand the mechanism of polyacrylamide (PAM) conditioning for sewage sludge dewatering*, *RSC Adv.* 7 (2017) 30274–30282.
<https://doi.org/10.1039/C7RA05202B>
- [30] N.P. Zombré, *Influence des composts urbains sur les propriétés physiques d'un sol ferrugineux tropical et la productivité du maïs*, *Cah. Agric.* 15(6) (2006) 571–577.
<https://doi.org/10.1051/cagri:2006017>
- [31] I.M. Abdou, Y.B. Hassane, T.M. Mella, A. Zanguina, *Etude des caractéristiques physico-chimiques d'un compost élaboré par une technique de compostage innovante à Madaoua, Niger*, *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 18(3) (2024) 1166–1179.
<https://doi.org/10.4314/ijbcs.v18i3.10>
- [32] E. Compaoré, L.S. Nanema, S. Bonkougou, M.P. Sedogo, *Évaluation de la qualité de composts de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso, Burkina Faso pour une utilisation efficiente en agriculture*, *J. Appl. Biosci.* 33 (2010) 2076–2083.
<https://doi.org/10.4314/jab.v33i1.52099>
- [33] M. Lo, D. Dieng, S. Ndiaye, C. Diop, A. Seck, A. Gueye, *Co-compostage de boues de vidange domestiques avec des déchets maraîchers et des déchets de poissons à Dakar (Sénégal)*, *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 13(6) (2019) 2914–2929.
<https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i6.38>
- [34] F. Amery, E. Vandaele, H. Smeets, H.L. Kristensen, K. Loades, *Compost organic matter content varied five-fold and determined compost quality across 107 composts of the North Sea Region*, *Waste Manage.* 210 (2026) 115259.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115259>
- [35] FAO, *Compost and Organic Fertilizer Guidelines for Agricultural Use*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015).
<https://www.fao.org/>
- [36] R. Xiong, X. Gao, X. Tu, Y. Mao, L. Jiang, L. Zheng, *Heavy metal remediation in sludge compost : recent progress*, *J. Renew. Mater.* 10(2) (2022) 401–418.
<https://doi.org/10.32604/jrm.2022.019876>
- [37] B. Dridi, F. Zerrouk, *Apport de boues d'épuration et propriétés d'un sol en Algérie*, *Cah. Agric.* 9(1) (2000) 69–71.
<https://doi.org/10.1051/cagri:2000110>
- [38] J. Wang, W. Liu, L. Chen, X. Tang, *pH-dependent mobility and speciation of Cd and Zn in compost-amended soils*, *Chemosphere* 327 (2023) 138485.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138485>
- [39] A. Guivarch, *Valeur fertilisante à court terme du phosphore des boues de stations d'épuration urbaines*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy, France (2001).
<https://hal.science/>
- [40] D.L. Sparks, *Environmental Soil Chemistry*, 2^e éd., Academic Press (Elsevier), San Diego (2003).
<https://www.elsevier.com/>
- [41] Y. Zhong, W. Yang, Q. Zhu, Z. Cao, Q. Chen, L. Xiao, *Research progress on heavy metal passivators and passivation mechanisms of organic solid waste compost : a review*, *Fermentation* 10(2) (2024) 88.
<https://doi.org/10.3390/fermentation10020088>
- [42] B.J. Alloway, *Heavy Metals in Soils : Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*, 3^e éd., Environmental Pollution vol. 22, Springer, Dordrecht (2013).
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>

- [43] A. Kabata-Pendias, H. Pendias, Trace Elements in Soils and Plants, 4^e éd., CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton (2011) 520–548.

<https://www.routledge.com/Trace-Elements-in-Soils-and-Plants/Kabata-Pendias/p/book/9781439804894>