

Détermination des facteurs d'émission de GES à travers l'ACV dans les unités d'enfouissement, de compostage et de recyclage du CTVD de Ouagadougou

Nana Bernard^{1,2*}, Attaglo Nukunu Komlan Guillaume¹, Kinda Sid-Noma Anne-Marie¹,
Ouoba Samuel^{1,3} and Béré Antoine¹

¹Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement, Université Joseph Ki-Zerbo, Ouagadougou, Burkina Faso,
nukunuattaglo@yahoo.com

²Institut des Science et de Technologie, Ecole Normale Supérieure, Koudougou, Burkina Faso,
*nsbernard@yahoo.fr

³Ecole Polytechnique de Ouagadougou, Ouagadougou, Burkina Faso

INFOS SUR L'ARTICLE

Historique de l'article:

Reçu le : 10 août 2023

Reçu en format révisé le : 14 Octobre 2023

Accepté le 05 Janvier 2024

Mots-Clés: Analyse du Cycle de Vie, Gaz à effet de serre, Facteurs d'émission, Déchets Solides Municipaux, Ouagadougou

Keywords: Life Cycle Assessment, Greenhouse gases, Emission factors, Municipal Solid Waste, Ouagadougou

RESUME

Cette étude est une contribution à la quantification des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des déchets des pays en développement, notamment par la détermination de facteurs d'émissions spécifiques. L'objectif est de déterminer les facteurs d'émission de gaz à effet de serre des différentes unités de traitement des déchets au centre de traitement et de valorisation de déchets de la ville de Ouagadougou (Burkina Faso) par la méthode d'Analyse du Cycle de Vie. Les facteurs d'émission ont été évalués puis ramenés à une émission équivalente de CO₂ par tonne de déchets. Les résultats nous montrent que l'enfouissement a le facteur d'émission le plus élevé, avec des valeurs variant de 751,19 à 1818,6 Kg éq. -CO₂/tonne de déchets pour les émissions directes selon que l'on tienne compte du carbone séquestré ou non, et de 7,24 et 1,31 Kg éq. -CO₂/tonne pour les émissions indirectes. Les unités de compostage et de valorisation plastique ont, quant à elles, des FE négatifs sur l'ensemble de leur cycle de vie (-69,69 et -1736,65 Kg éq. -CO₂/tonne), participant ainsi à des économies nettes de gaz à effet de serre. Cette étude est une première, car elle fournit des données pouvant aider à la comptabilisation nationale des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des déchets.

ABSTRACT

This study is a contribution to the quantification of greenhouse gas emissions in the waste sector in developing countries, especially through the determination of specific emission factors. The purpose is to determine the greenhouse gas emission factors of the various waste treatment units at the waste treatment and recovery centre in Ouagadougou (Burkina Faso) using the Life Cycle Analysis method. The emission factors were evaluated and then reduced to an equivalent CO₂ emission per tonne of waste. The results show that landfill has the highest emission factors, with values ranging from 751.19 to 1,818.6 kg CO₂ eq/tonne of waste for direct emissions, depending on whether or not sequestered carbon is taken into account, and from 7.24 to 1.31 kg CO₂ eq/tonne for indirect emissions. Composting and plastic recovery units have negative EFs over their entire life cycle (-69.69 and -1736.65 Kg CO₂ eq/tonne), thus contributing to net greenhouse gas savings. This study is the first of its kind to provide data that can be used for national accounting of greenhouse gas emissions in the waste sector.

I. INTRODUCTION

La gestion des déchets solides est aujourd'hui considérée comme un contributeur important à de nombreux problèmes environnementaux, tels que le changement climatique, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, des dommages à la santé humaine et aux écosystèmes, l'épuisement des ressources, etc. (Laurent, et al., 2014a). De nombreux outils peuvent être utilisés pour évaluer l'impact environnemental des différentes options de traitement des déchets (Ekvall T., 2007) (Ekvall, Assefa, Björklund, Erikssen, & Finnveden, 2007). L'analyse du cycle de vie (ACV) est l'un de ces outils. Elle peut être utilisée, lorsque l'on veut étudier l'impact du changement climatique par exemple, pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre (GES) ou encore pour déterminer les facteurs d'émission de GES de différentes options de traitements de déchets.

Les facteurs d'émission (FE) de GES du secteur des déchets ont été développés et intégrés dans de nombreux modèles de comptabilisation basés sur l'ACV (Del Borghi

A., 2009; Gentil E.C., 2010; Björklund, Finnveden, & Roth, 2011). Mais la plupart des outils et publications dérivant et utilisant des FE ont été développés dans les pays dits développés et émergents. Il est donc nécessaire de développer des FE reflétant aussi fidèlement que possible la réalité des pays en voie de développement.

Au Burkina Faso, la ville de Ouagadougou, avec une population estimée aujourd'hui à 3 millions habitants (Commune de Ouagadougou, 2020a) pour une production annuelle de déchets de l'ordre de 680 000 tonnes (Commune de Ouagadougou, 2020b), dispose d'un grand Centre de Traitement et de Valorisation de Déchets (CTVD). Ce centre se donne pour objectif d'éliminer et/ou de valoriser les déchets produits au sein de ladite ville.

Le présent article vise donc à présenter le fruit des recherches menées en utilisant l'ACV pour déterminer les facteurs d'émission de GES propres aux différentes unités de traitement des déchets au CTVD de Polesgo à Ouagadougou notamment l'unité d'enfouissement, l'unité de compostage et l'unité de recyclage du CTVD.

II. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

La méthodologie ACV selon l'organisation internationale de la normalisation (ISO), se déroule en quatre étapes que nous décrivons ci-dessous.

II.1. Définition des objectifs et du champ d'étude

L'objectif de l'étude consiste à déterminer les FE de GES des différentes unités de traitement des déchets au CTVD de Polesgo à Ouagadougou. Le système étudié comprend les étapes de transport des déchets des Centres de Collecte et de Tri (CCT) au CTVD, puis le traitement des déchets par enfouissement, par compostage et par recyclage au CTVD. Les limites du système sont présentées dans la figure 1 ci-dessous.

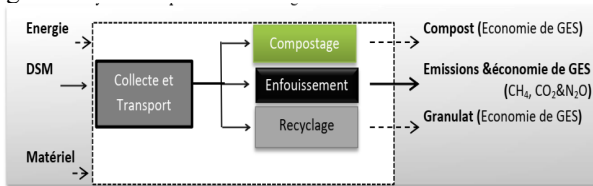


Fig. 1. Limites du Système.

Pour le type d'impact, nous n'avons comptabilisé que les émissions de GES à l'aide de la méthode ACV classique compte-tenu du fait que nous ne disposons pas de logiciels ACV. Et tout comme (Chen & Lin, 2008), notre évaluation du procédé a porté spécifiquement sur la quantité de déchets.

L'unité fonctionnelle de notre étude est la *quantité en Kilogrammes d'équivalents CO₂ dégagée par tonne de déchets par an*. Les gaz que sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) ont été évalués.

II.2. Inventaire du cycle de vie (ICV)

La moyenne annuelle des données disponibles des années 2016-2020 a été considérée pour notre étude. Les unités de traitement des déchets du CTVD concernées sont celles de l'enfouissement, du compostage et de la valorisation du plastique :

- *Système 1 : enfouissement des déchets*

Notre scénario d'enfouissement inclut le carbone séquestré et tient compte du carbone perdu dans le lixiviat comme l'indique la Figure 2 ci-dessous :

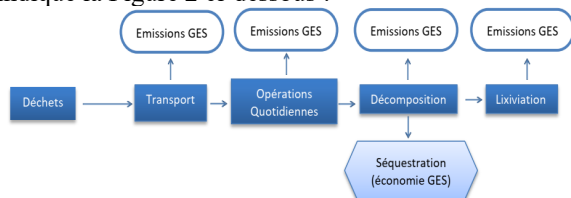


Fig. 2. Organigramme de l'ACV des GES de l'enfouissement

- Émissions indirectes dues au transport des déchets en amont

Les FE issus du transport des déchets ont été évalués à 2,61 kg CO₂/L de Diesel dans une étude parallèle (Kinda, 2023). Nous avons utilisé cette valeur pour exprimer les FE en Kg éq.-CO₂/tonne de déchets suivant l'équation (1)

définie ci-dessous en nous inspirant de (Friedrich & Christina, 2013a) :

$$FE_{Trp} = \frac{Q_{carb} \times FE_T}{D_{Trp}} \quad (1)$$

FE_{Trp} : Facteur d'Emission du transport des déchets exprimés en Kg éq.CO₂/tonne de déchet ;

Q_{carb} : Quantité de carburant consommée durant une année en litre ;

FE_T : Facteur d'Emission du transport des déchets exprimé en kg CO₂/L (Kinda, 2023) ;

D_{Trp} : Moyenne de déchets annuels arrivant au CTVD en tonne

- Émissions directes de décomposition des matières organiques enfouis

Des paramètres de calcul notamment la teneur en carbone dégradable (COD) ont également été définis afin de réaliser des bilans carbonés. La quantité totale de COD obtenu dans la caractérisation des déchets de la ville de Ouagadougou est de 100,41 kg.C/tonne. La Fraction de COD dissimilé comme gaz d'enfouissement est pris égale à 50%, celle dissimulée sous forme de lixiviat est de 2% et la quantité stockée est de 48%.

En se basant sur la méthodologie présentée en détails par (S. Manfredi, 2009) et en partant de la même hypothèse que, sur une base massique, 55 % du COD qui donne lieu au gaz enfoui devient du CH₄ et 45% devient du CO₂, il a été calculé, en tenant compte de la séquestration du carbone, des FE en se basant sur l'équation (2) suivante adapté de (Friedrich & Christina, 2013a):

$$CH_{4stock}(kg) = COD \times COD_{enf} \times 55 / 100 \times 16 / 12 \quad (2)$$

Où 16/12 est le facteur stœchiométrique pour convertir le carbone en CH₄.

De la même manière, la quantité de CO₂ biogénique généré (y compris celui qui s'échappe par le lixiviat) peut être calculée à l'aide de l'équation (3) suivante :

$$CO_{2stock} = 44/12 \times [(COD \times COD_{enf} \times 45/100) + (COD \times COD_{lix})] \quad (3)$$

Où 44/12 est le facteur stœchiométrique pour convertir le carbone en CO₂.

Dans le cas où l'on ne veut pas tenir compte du stockage du carbone, l'on ne tiendra plus compte de la fraction de COD stockée et donc de la fraction de COD dissimilé comme gaz d'enfouissement. Dans ce cas, les équations (2) et (3) deviennent les équation (4) et (5) suivantes :

$$CH_4(kg) = COD \times (1 - COD_{lix}) \times 55 / 100 \times 16 / 12 \quad (4)$$

$$CH_4(kg) = [(COD \times (1 - COD_{lix}) \times 45 / 100) + (COD \times COD_{lix})] \times 44 / 12 \quad (5)$$

Pour calculer les émissions de CH₄ provenant de l'élimination de déchets solides, nous utiliserons l'équation suivante tirée de (GIEC, 2006) :

$$E_{CH_4} = CH_4 \times MCF \times (1 - OX) \quad (6)$$

E_{CH_4} : Quantité de méthane émis

CH_4 : Quantité de méthane généré (Avec ou sans stockage)

MCF : Coefficient de correction du méthane (ici MCF = 1)

OX : Facteur d'oxydation du méthane (fraction = 0,1 pour les catégories de SEDS gérés selon (GIEC, 2006))

Pour convertir la quantité de CH₄ émise en équivalent CO₂ (éq.-CO₂), un potentiel de réchauffement

global (PRG) de 28 (1 kg CH₄ = 28 Kg éq.-CO₂) a été utilisé (IPCC, 2021).

- Emissions indirectes de GES associées à la consommation de combustibles fossiles dans le cadre des opérations quotidiennes

Elles ont été calculées en prenant les valeurs de (Frøgaard T., 2009) en Kg CO₂/L du diesel de par la difficulté des mesures sur terrain. La valeur en Kg/L a été convertie en Kg CO₂/tonne suivant l'équation (7) :

$$FE_{op} = \frac{Q_{carb} \times FE_d}{D_{enf}} \quad (7)$$

FE_{op} : Facteur d'émissions des activités opérationnelles (kg CO₂/tonne de déchets transportés) ;

Q_{carb} : Quantité totale de diesel consommée dans l'année pour les opérations quotidiennes en litre ;

FE_d : Facteur d'émission du CO₂ du Diesel (Frøgaard T., 2009)

D_{enf} : Moyenne de déchets enfouis annuellement au CTVD

- Système 2 : compostage des déchets verts

Selon le concept AEA « Amont, exploitation, aval » (Gentil, Christensen, & Aoustin, 2009), les émissions de GES définies sont :

- Émissions directes ou d'exploitation : elles représentent la combustion de gasoil pour le broyage des déchets à composter et les émissions de CH₄ et N₂O émis pendant la dégradation des déchets organiques.

- Emissions indirectes ou évitées ayant lieu en dehors du site de compostage, dont il existe deux catégories :

- Les activités en amont telles que le transport des déchets de jardin vers le site de compostage à travers la quantité de carburant consommée

- Les activités en aval telles que sont les économies dues à la substitution d'engrais inorganiques grâce à l'application de compost et au carbone lié au sol grâce à l'application de compost.

Nous évaluerons les émissions de GES de chacune de ces activités et les additionnerons pour déterminer le facteur d'émission propre au compostage.

- Système 3 : valorisation du plastique

Les émissions de GES issues du recyclage

Les émissions de GES du recyclage ont été calculées sur la base d'émissions directes et indirectes de CO₂ :

- Émissions directes : Ce sont les émissions issues de la combustion de gasoil pour le broyage et la transformation en granulats des déchets plastiques.
- Emissions indirectes dont il existe deux catégories :

- Les activités en amont consistant à transporter des DSM des CCT vers le CTVD. Ici, nous nous intéresserons à la quantité de carburant consommée.

- Les activités en aval qui sont les émissions évitées grâce à la substitution du plastique vierge. Dans notre cas, elles seront estimées grâce aux données fournies par la littérature.

Nous évaluerons les émissions de GES de chacune de ces activités et les additionnerons pour déterminer le facteur d'émission propre au Recyclage.

II.3. Evaluation de l'impact

- Objectif : Cette étape vise à transcrire le bilan matière-énergie en termes de conséquences sur l'environnement.
- Cadre Méthodologique : Toutes les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, NO₂, ...) vont être ramenées à une émission équivalente de CO₂.

II.4. Interprétation des résultats

Nous procéderons à un bilan des résultats et de la méthode. Ensuite, nous identifierons des étapes du cycle de vie sur lesquelles intervenir pour des calculs d'émissions de GES au sein du CTVD plus judicieux.

Ces deux (02) points constitueront l'essentiel du contenu du chapitre Résultats et discussion

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Facteurs d'émissions de GES provenant de l'enfouissement

a- Facteurs d'émissions directs de GES provenant de l'enfouissement

Elles sont résumées dans le tableau 1 ci-dessous. Les émissions de CO₂ biogénique n'y ont été incluses qu'à titre d'information.

Tableau 1. FE de Carbone séquestré, de CH₄ et de CO₂ biogénique pour l'unité d'enfouissement du CTVD (kg/ tonne de déchets humides)

Données du site d'enfouissement	Carbone séquestré	FE CH ₄		FE CO ₂ biogénique	
		Avec stockage	sans stockage	Avec stockage	sans stockage
Valeurs	48,20	33,14	64,95	90,20	169,73

Le tableau 1 nous présente les facteurs émissions en tenant compte de deux (02) différentes approches. La première approche tient compte du stockage considérable de carbone dans les sites d'enfouissement sur une période de 100 ans, et la seconde néglige cette séquestration. La quantité de carbone séquestrée a été calculée sur la base du pourcentage de COD contenu dans les cellules qui sera stockée (48% de 100,41 Kg C/tonne de déchets humides). Pour certains auteurs (S. Manfredi, 2009; Christensen T. H., 2009), cette séquestration du carbone biogénique devrait être systématiquement inclus dans la comptabilisation. D'autres approches n'incluent pas le carbone stocké dans les décharges (la méthode du GIEC (GIEC, 2006; IPCC, 2019)). Cette dernière approche est celle qui est la plus utilisée dans les estimations nationales de GES.

Le tableau 2 ci-dessous présente les émissions directes globales de GES pour l'unité d'enfouissement du CTVD. Celles-ci ont été calculées en tenant compte du CH₄ émis (avec un PRG de 28) et en soustrayant le carbone séquestré (sous forme de CO₂). La séquestration du carbone est neutre si le carbone est simplement séquestré (c'est-à-dire que les déchets ne se décomposent et ne génèrent pas de méthane). Cependant, en réalité, le carbone séquestré est retiré du cycle du carbone et peut donc être soustrait dans le bilan carbone global. Les deux scénarios sont présentés.

Tableau 2. Facteurs d'émissions directes globales de GES pour l'unité d'enfouissement du CTVD (Kg éq. -CO₂/tonne de déchets humides).

Données du site d'enfouissement	Avec stockage	Sans stockage
Emissions de CH ₄	927,92	1818,6
Emissions directes globales de GES avec une séquestration neutre de carbone	927,92	1818,6
Emissions globales de GES directs avec soustraction du carbone séquestré	751,19	1641,87
Émissions évitées à cause du carbone séquestré	- 176,73	- 176,73

Les facteurs calculés et tenant compte de la séquestration du carbone sont dans la plage de FE publiés dans la littérature, c'est-à-dire entre 300 et 1291 kg éq.-CO₂/tonne (Friedrich & Christina, 2013a; S. Manfredi, 2009; Barton, Issaias, & Stentiford, 2008). Les différences sont dues à la non-récupération de gaz de décharge, mais surtout à la teneur en COD, qui dans notre cas, est plutôt faible. Cette faible teneur en COD s'explique par l'importante composition des déchets en éléments fins, qui à eux seuls représentent un peu moins de 40% (38,18%) de la masse de déchets. La soustraction du carbone séquestré fait une différence substantielle pour l'enfouissement et, par conséquent, il est important pour tout exercice de comptabilisation des GES au niveau l'unité d'enfouissement du CTVD de signaler si le carbone séquestré a été inclus et comment.

b- Facteurs d'émissions indirects de GES provenant de l'enfouissement

Ils sont présentés dans le Tableau 3 suivant.

Tableau 3. Facteurs d'émissions indirectes de GES pour le CTVD

Type d'émission de GES	FE du diesel selon (Fruegaar d T., 2009)	FE du diesel utilisé dans nos calculs (Kg CO ₂ /L)	FE dérivé en kg éq.-CO ₂ /tonne de Déchets	Observations
Transport des déchets en amont	2,7 kg CO ₂ /L	2, 61 kg CO ₂ /L	7,24 kg éq.-CO₂/tonne	Mesures expérimentales
Consommation de Diesel pour les opérations quotidiennes	2,7 kg CO ₂ /L	2,7 kg CO ₂ /L	1,31 kg éq.-CO₂/tonne	Absence de données locales

Les émissions de GES résultant de la combustion du diesel sont le CO₂, le CH₄ et le N₂O; bien que les quantités de CH₄ et de N₂O soient négligeables par rapport à la quantité de CO₂ émise (Yan Zhao Y., 2009). Cependant, les mesures expérimentales menées dans le cadre de cette étude (Kinda, 2023) n'ont permis de déterminer que le CO₂ émis, soit **7,24 kg éq.-CO₂ émis/tonne de déchets**. Cette valeur se retrouve dans la fourchette de résultats publiés pour le transport des déchets dans les agglomérations urbaines à forte densité (4,2-9,5 kg éq.-CO₂/tonne) et dans

les agglomérations urbaines de densité moyenne (3,7-15 kg éq.-CO₂/tonne) au Danemark (Larsen A.W., 2009a).

Quant aux opérations quotidiennes sur le site d'enfouissement (notamment le compactage des déchets enfouis et le recouvrement des cellules d'enfouissement remplis), par absence de données locales, nous nous sommes basés sur le FE moyen en Kg/L de la littérature pour évaluer le FE à **1,31 kg éq.-CO₂/tonne**. En comparaison, sa valeur en Afrique du Sud par exemple, est de 2,7 kg éq.-CO₂/tonne (Friedrich & Christina, 2013a). Cette différence s'explique par le fait que la valeur de ce FE est dépendante de la quantité de déchets enfouis annuellement.

III.2. Facteurs d'émissions de GES provenant du compostage des déchets verts au sein du CTVD

Les calculs impliqués pour trouver le facteur d'émission dérivé provenant du compostage des déchets verts au sein du CTVD sont présentés dans le Tableau 4 suivant.

Tableau 4. Facteur d'émission de GES pour l'unité de compostage au sein du CTVD

Calcul du Facteur d'émission	Source, référence ou commentaire
Processus indirects en amont	
Transport des déchets à composter vers le CTVD : $FE_{Trp} = \frac{Q_{carb} \times FE_T}{D_{Trp}} = 7,24 \text{ kg CO}_2 / \text{tonne}$	DSPH, EBTE (Entretien direct avec les responsables en charge du transport) Extrapolation des données carburant de EBTE à EGC compte-tenu de la difficulté à entrer en contact avec les responsables de EGC (FE_T issu d'études parallèles)
Émissions directes de GES provenant des procédés du compostage	
1. Combustion de gasoil par le broyeur pour le broyage et chargement des déchets de jardin : $FE_{Broy} = \frac{Q_{carb} \times FE}{D_{Comp}} = 17,10 \text{ kg CO}_2 / \text{tonne}$	DSPH, (Entretien direct avec les responsables du service traitement et valorisation des déchets)
2. Emissions de CH ₄ dues au compostage : Détermination Expérimentale au labo puis calcul $FE_{CH_4} = [(T_{C_i} - T_{C_e}) \times 0,027 \times 16 / 12] \times PRG_{CH_4}$ $FE_{CH_4} = 121,67 \text{ kg éq.-CO}_2 / \text{tonne}$	CTVD, laboratoires d'analyse Série d'études locales entreprises au CTVD combinées aux calculs de bilans massiques Il a été supposé que 2,7 % (l'un des pires scénarios) du carbone dégradé deviendra du CH ₄ et 1,8 % de l'azote entrant entraînera la formation de N ₂ O (Boldrin, Andersen, Moller, Christensen, & Favoino, 2009)
3. Emissions de N ₂ O dues au compostage : Détermination Expérimentale au labo puis calcul $FE_{N_2O} = [(T_{N_1} - T_{N_2}) \times 0,018 \times 44 / 28] \times PRG_{N_2O}$ $FE_{CH_4} = 38,77 \text{ kg éq.-CO}_2 / \text{tonne}$	
Processus indirects en aval	
Économies dues à la substitution d'engrais inorganiques grâce à l'application de compost : FE _{Sub} En supposant un taux de substitution pour N de 50 %, En supposant que 13 Kg éq. CO ₂ /kg N 3,095 Kg éq. CO ₂ /kg P et 1,53 Kg éq. CO ₂ /kg K sont émis pour la production d'engrais inorganiques : $E_{Sub} = [(50\% \times T_{N \times 13 \text{ kg CO}_2 / \text{kg N}}) + (T_{P \times 3,095 \text{ kg CO}_2 / \text{kg P}}) + (T_{K \times 1,53 \text{ kg CO}_2 / \text{kg K}})]$	Taux de substitution pour N résumés par (Boldrin, Andersen, Moller, Christensen, & Favoino, 2009) est de 20 à 60 % Scénario du pire des cas à partir des valeurs de la littérature résumées par (Boldrin, Andersen, Moller, Christensen, & Favoino, 2009)

1,53 kg CO ₂ /kg K)] = 194,20 Kg éq.-CO₂/tonne	
Économies dues au carbone lié au sol grâce à l'application de compost : E _{App} En supposant que 8 % du carbone du compost est lié au sol (pendant 100 ans), les économies sont calculées à partir du C dans le compost E_{App} = 8% × T_{Cx44} / 12 = 53,18 Kg éq.-CO₂/tonne	% C lié à partir de (Boldrin, Andersen, Moller, Christensen, & Favoino, 2009)

$$FE_{Comp} = FE_{Trp} + FE_{Broy} + FE_{CH4} + FE_{N2O} - FE_{Sub} - FE_{App} = -69,69 \text{ kg éq.-CO}_2 / \text{tonne}$$

FE (kg éq CO₂/L) : facteur d'émission du diesel : 2,7 kg CO₂/L (Fruegaard T., 2009)

T_{C1} : Quantité de C résultant de 1 tonne de déchets compostés (Bilan massique)

T_C : Quantité de C résultant de 1 tonne de compost (Bilan massique)

T_{N1} : Quantité de N résultant de 1 tonne de déchets compostés (Bilan massique)

T_N : Quantité de N résultant de 1 tonne de compost (Bilan massique)

PRG_{CH4} : Potentiel de réchauffement global du CH₄ (28 kg de CO₂/kg de CH₄) (IPCC, 2021)

PRG_{N2O} : Potentiel de réchauffement global de N₂O (298 kg de CO₂/kg de N₂O) (IPCC, 2021)

T_P : Quantité de P résultant de 1 tonne de compost (Bilan massique)

T_K : Quantité de K résultant de 1 tonne de compost (Bilan massique)

Les émissions directes de GES présentées au sein du **Tableau 4**, sont fonction de la combustion de gasoil pour le broyage des déchets à composter et des émissions de CH₄ et N₂O (en petites quantités) pendant la dégradation des déchets organiques (Boldrin, Andersen, Moller, Christensen, & Favoino, 2009). Elles ont été calculées à partir du FE diesel en Kg/L fourni par la littérature (2,7 kg/L) du fait de la difficulté à faire des mesures sur le terrain. Pour les émissions de CH₄ et N₂O résultant de la dégradation des déchets organiques, les données ont fournies par la commune de Ouagadougou. Ces données ont montré qu'en moyenne, une tonne de déchets à composter contient 302 kg de carbone et 13,7 kg d'azote. La teneur moyenne en humidité est de 38,1%. Une tonne de compost, en revanche, contient 181,3 kg de carbone et 9,1 kg d'azote avec une teneur moyenne en humidité de 30%. La méthodologie présentée par (Boldrin, Andersen, Moller, Christensen, & Favoino, 2009) a été suivie pour calculer les GES provenant de la dégradation des déchets lors du compostage. Il a été supposé que 2,7 % (l'un des pires scénarios) du carbone dégradé deviendra du CH₄ et que 1,8 % de l'azote perdu entraînera la formation de N₂O (Boldrin, Andersen, Moller, Christensen, & Favoino, 2009). Les calculs effectués donnent des émissions de **4,3452 kg CH₄/tonne** et de **0,1301 kg N₂O/tonne**, ce qui est similaire aux valeurs par défaut du GIEC (4 kg CH₄/tonne et 0,3 kg N₂O/tonne).

Les émissions indirectes ont aussi été prises en compte. En amont, les émissions indirectes sont celles issues du transport des déchets vers le CTVD. Elles ont été déterminées au point III.1 de ce chapitre (Voir **Tableau 8**). Les émissions indirectes en aval, quant à elles, regroupent les économies nettes de GES. Ces économies de GES dues au compost se produisent lorsque le compost est utilisé à la place d'un engrais inorganique et lorsque le carbone est lié au sol après l'application du compost (Boldrin, Andersen, Moller, Christensen, & Favoino, 2009). Au Burkina Faso, les principales utilisations du compost provenant des déchets municipaux sont à des fins agricoles (par les maraichers et agriculteurs biologiques) (Commune de Ouagadougou, 2020b). Dans ce contexte, seules les économies liées au remplacement des engrais inorganiques et à la fixation du carbone au sol ont été prises en compte.

Le calcul des économies liées au remplacement des engrais inorganiques a nécessité les quantités d'azote (9,1 kg N/tonne), de phosphore (12 kg P/tonne) et de potassium (125 kg K/tonne) présentes dans le compost. Quant à la comptabilisation des économies dues au carbone lié au sol grâce à l'application de compost, il a été supposé (d'après (Boldrin, Andersen, Moller, Christensen, & Favoino, 2009)) que 8 % du carbone présent dans le compost est lié au sol pendant 100 ans.

Le Facteur d'émission du compostage a été calculé en additionnant les émissions directes et indirectes de GES, les économies en aval constituant des émissions nettes négatives à retrancher. Les résultats nous montrent que le Facteur d'émission du compostage a une valeur négative qui est de **-69,69 Kg éq.-CO₂/tonne**. Par conséquent, le compostage au sein du CTVD participe à une économie de GES émis au sein du secteur des déchets. En comparant nos résultats avec les données de la littérature, on peut observer que le facteur calculé est valable. En effet, le FE que nous avons calculé se situe dans la fourchette d'émissions pour le compostage en Europe qui varie de -900 (économies nettes) à 300 (émissions nettes) kg éq.-CO₂/tonne de déchets humides (Boldrin, Andersen, Moller, Christensen, & Favoino, 2009). D'autres résultats publiés, par-contre, montrent des émissions nettes de GES en Côte d'Ivoire et dans certaines agglomérations africaines (Yeo D., 2020; Komakech A.J., 2015). La grande disparité entre la valeur que nous avons obtenue et les valeurs publiées dans la littérature pour les émissions de compostage en Afrique peut s'expliquer par la composition des déchets compostés (déchets de jardin versus déchets alimentaires) et surtout par la comptabilisation des processus d'émissions de GES indirects en aval. En effet, elles sont basées entièrement sur des hypothèses issues de données relatives à l'Europe et n'ont pu être déterminées in situ.

III.3. Facteurs d'émissions de GES provenant de la valorisation du plastique au sein du CTVD

Tableau 5. Facteur d'émission de GES pour l'unité de valorisation du plastique au sein du CTVD

Calcul du Facteur d'émission	Source, référence ou commentaire
Processus indirects en amont	
Transport des déchets à composter vers le CTVD : $FE_{Trp} = \frac{Q_{carb} \times FE_T}{D_{Trp}}$ $FE_{Trp} = 7,24 \text{ kg CO}_2 / \text{tonne}$	DSPH, EBTE (Entretien direct avec les responsables en charge du transport) Extrapolation des données carburant de EBTE à EGC compte-tenu de la difficulté à entrer en contact avec les responsables de EGC (FE _{Trp} issu du mémoire de Anne-Marie KINDA)
Émissions directes de GES provenant des procédés du recyclage	
Combustion de gasoil pour le broyage et la transformation en granulats des déchets plastiques $FE_{Broy} = \frac{Q_{carb} \times FE_{GE}}{D_{Recy}}$ $FE_{Broy} = 155,11 \text{ kg CO}_2 / \text{tonne}$	DSPH (Entretien direct avec les responsables du service traitement et valorisation des déchets) FE _{GE} déterminé par des mesures du panache de fumée s'échappant du groupe électrogène
Processus indirects en aval	
Émissions évitées grâce à la substitution du plastique vierge :	Malheureusement, il n'existe pas de données locales sur les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production

$FE_{Evi} = 1899 \text{ kg CO}_2/\text{tonne}$	de plastiques. Les données de (Menikpura N., 2013) pour les émissions de GES évitées grâce à la substitution du plastique vierge ont été utilisées.
TOTAL : $FE_{recyclage} = E_{Transport} + E_{Broyage} - E_{Ev} = -1736,65 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne}$	

$FE_{GE} (\text{kg CO}_2/\text{L})$: facteur d'émission du diesel s'échappant du Groupe Electrogène (mesures expérimentales)

Le **Tableau 5** permet de comprendre que les émissions directes issues de la valorisation plastique ne concernent que l'activité du broyeur qui utilise l'énergie fournie par le Groupe électrogène pour fonctionner. Cette énergie étant dérivée de la combustion du diesel, cela revient à quantifier les émissions de GES issus de cette combustion. A l'aide de mesures sur le terrain (Voir *annexe 7*), elle a été calculée à $2,61 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{L}$. en tenant compte de la quantité de carburant consommée par le groupe électrogène et de la quantité de déchets plastiques recyclée annuellement, nous obtenons un facteur de **$155,11 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne}$** . Cette valeur est loin des valeurs trouvées en Afrique du Sud (**$432,6 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne}$**) pour les émissions directes issues du recyclage plastique en Afrique du Sud (Friedrich & Christina, 2013a). Ceci s'explique lorsque l'on sait que les opérations directes de lavage, séchage, compactage et de broyage se faisaient à la machine au niveau des unités étudiées en Afrique du Sud (Friedrich & Christina, 2013a).

En ce qui concerne les émissions indirectes, celles en amont sont celles issues du transport des déchets vers le CTVD. Elles ont été déterminées au point III.2 de ce chapitre (Voir **Tableau 4**). Celles en aval représentaient les émissions de GES évitées grâce à la substitution du plastique vierge par les granulés issus du broyeur. Et vu que nous ne disposons pas de données locales sur les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production de plastiques, les données de Thaïlande (Menikpura N., 2013) pour les émissions de GES évitées grâce à la substitution du plastique vierge ont été utilisées. Le Facteur d'émission issu de la valorisation du plastique a donc été calculé en additionnant les émissions directes et indirectes de GES, les économies en aval constituant des émissions nettes négatives. Les résultats de nos calculs nous ont donné un facteur d'émission qui était négatif (**$-1736,65 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne}$**) au sein de cette unité : le recyclage des déchets plastiques au sein du CTVD participe à une économie de GES émis au sein du secteur des déchets. En comparaison, les résultats en Afrique du Sud (Friedrich, Elena; Trois, Christina, 2013b) aboutissent également à des émissions de GES nettes négatives pour les différents types de plastique (**$-859,4 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne}$** pour le PEHD (Polyéthylène Haute Densité), **$-719,4 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne}$** pour le PP (Polypropylène), **$-789,4 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne}$** pour le PET (Polyéthylène téréphtalate), **$-1832,4 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne}$** pour le PS (Polystyrène)).

III.4. Limites de l'étude

Pour les calculs de différents facteurs d'émission de GES, quelques incertitudes demeurent compte-tenu des hypothèses qui ont dû être faites. Et chacune de ces hypothèses peut avoir introduit une marge d'erreur. Parmi les facteurs d'émission calculés, le facteur issu du plus

petit nombre d'hypothèses et du plus grand nombre de paramètres mesurés est le facteur d'émission pour l'enfouissement. Ceux qui utilisent le plus d'hypothèses sont les facteurs d'émission de GES pour le compostage et le recyclage du plastique. En particulier, l'utilisation de données de la littérature pour le calcul des émissions indirectes en aval des GES des unités de compostage et de recyclage du plastique sont des estimations hypothétiques. Mais en dépit de ces incertitudes, les facteurs qui ont été calculés dans ce document sont les plus représentatifs des émissions de GES au sein du CTVD de Ouagadougou.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons appliqué la méthodologie de l'ACV pour déterminer les facteurs d'émission de GES des différentes unités de traitement des déchets au CTVD de Polesgo à Ouagadougou. Plus spécifiquement, il s'agissait de déterminer les facteurs d'émission au sein respectivement des unités d'enfouissement, de compostage et de recyclage du CTVD. Les résultats nous ont montré que l'enfouissement est l'unité du CTVD qui a le FE le plus élevé. En effet, les *FE directs* provenant des émissions de méthane des cellules d'enfouissement varient de **$751,19$ à $1818,6 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne de déchets}$** selon que l'on tienne compte du carbone séquestré ou non. Les *économies nettes* provenant de la séquestration de carbone s'élèvent à **$-176,73 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne de déchets}$** . Quant aux *émissions indirectes dues au transport des déchets vers le site d'enfouissement et aux opérations quotidiennes sur le site d'enfouissement* (notamment le compactage des déchets enfouis et le recouvrement des cellules d'enfouissement remplis), elles s'élèvent *respectivement* à **$7,24$ et $1,31 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne de déchets}$** . Les *unités de compostage et de valorisation plastique avec respectivement* **$-69,69 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne}$ et $-1736,65 \text{ Kg éq.-CO}_2/\text{tonne}$** ont, quant à elles, des facteurs d'émission négatives et doivent donc être mieux encadrées en vue de faire partie d'une stratégie globale de réduction des GES au sein du secteur des déchets au Burkina Faso en général et au CTVD en particulier.

Par conséquent, en dépit des limites constatées, les facteurs calculés dans cette étude sont considérés comme plus représentatifs des émissions de GES au sein du CTVD de la ville de Ouagadougou. Par ailleurs, cette étude pourrait servir de base à la méthodologie de détermination de Facteurs d'émission au niveau national de divers secteurs émetteurs de GES notamment celui des déchets.

V. REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur gratitude à la Direction de la Salubrité Publique et de l'Hygiène (DSPH) de la Commune de Ouagadougou pour leur avoir donné accès au CTVD afin de mener cette étude. Ils remercient également le Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement (LPCE) pour son appui logistique dans la conduite de ce travail de recherche.

VI. REFERENCES

- Barton, J. R., Issaias, I., & Stentiford, E. I. (2008). Carbon – making the right choice for waste management in developing countries. 28, 690–698.
- Björklund, A., Finnveden, G., & Roth, L. (2011). Application of LCA in waste management. In: T.H.Christensen, (Ed.). Wiley, Chichester, UK.
- Boldrin, A., Andersen, J. K., Moller, J., Christensen, T. K., & Favoino, E. (2009). Composting and compost utilization: accounting for greenhouse gases and global warming contribution. *International Solid Waste Association*, 27, 800–812.
- Chen, T.-C., & Lin, C.-F. (2008). Greenhouse gases emissions from waste management practices using Life Cycle Inventory model. *Journal of Hazardous Materials*, 155(1–2), pp. 23–31.
- Christensen T. H., G. E. (2009). C balance, carbon dioxide emissions and global warming potentials in LCA-modelling of waste management systems. *Waste Management and Research*, 27, pp. 707–715.
- Commune de Ouagadougou. (2020a, Décembre). *Rapport synthèse d'activités de la Direction de la Salubrité Publique et de l'Hygiène (DSPH) de l'année 2020*.
- Commune de Ouagadougou. (2020b, Mars). Schéma directeur de gestion des déchets solides de la ville de Ouagadougou.
- Del Borghi A., G. M. (2009). A survey of life cycle approaches in waste management. 14.
- Ekvall T., A. G. (2007). What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. 27.
- Ekvall, T., Assefa, G., Björklund, A., Erikssen, O., & Finnviden. (2007, October 1-5). Limitations and amendments in life-cycle assessment on waste management, Sardinia 2007. *Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium*. (S. M. Pula, Éd.) Cagliari, Italy.
- Friedrich, E., & Christina, T. (2013a). GHG emission factors developed for the Collection, Transport and Landfilling of Municipal Waste in South African Municipalities. 33, 1013–1026.
- Friedrich, Elena; Trois, Christina. (2013b). GHG emission factors developed for the Recycling and Composting of municipal waste in South African municipalities. 33, 2520–2531.
- Fruergaard T., E. T. (2009). Energy use and recovery in waste management and implications for accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27, pp. 724–737.
- Gentil E.C., D. A. (2010). Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions. 30.
- Gentil, E., Christensen, T. H., & Aoustin, E. (2009). GHG accounting and waste management. *Waste Management and Research*, 27, pp. 696–706.
- GIEC. (2006). *Lignes directrices du GIEC pour inventaires nationaux de gaz à effet de serre*.
- IPCC. (2019). Guidelines for National Greenhouse gas inventories.
- IPCC. (2021). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kinda, A.-M. S. (2023). *Quantification des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de déchets : cas du CTVD de Polesgo, Mémoire de master II*. Burkina Faso: Université Joseph KI-ZERBO-IGEDD.
- Komakech A.J., S. C. (2015). Life cycle assessment of biodegradable waste treatment systems for sub-Saharan African cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 99, pp. 100–110.
- Larsen A.W., V. M. (2009a). Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance. *Waste Management and Research*, 27, pp. 652–659.
- Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., . . . Christensen, T. H. (2014a). Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives. 34, 573–588.
- Menikpura N., J. S.-A. (2013). *Estimation Tool for Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Municipal Solid Waste (MSW) Management in a Life Cycle Perspective, Project of Measurement, Reporting and Verification (MRV) for low carbon development in Asia*. IGES, Version II (edited).
- S. Manfredi, D. T. (2009). Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, 27, pp. 825–836.
- Yan Zhao Y., W. H.-T.-J. (2009). Life-cycle assessment of the municipal solid waste management system in Hangzhou, China (EASEWASTE). *Waste Management & Research*, 27, pp. 399–406.
- Yeo D., D. K. (2020). Material Flows and Greenhouse Gas Emissions Reduction Potential of Decentralized Composting in Sub-Saharan Africa: A Case Study in Tiassalé, Côte d'Ivoire. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(7229), p. 15.