



coopération
allemande

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT



Émissions de gaz à effet de serre de différents concepts de production de compost à Madagascar

Fiche d'information pays Madagascar

Implemented by

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Résumé exécutif

Les résultats du bilan GES réalisé montrent des émissions de GES globalement faibles pour les concepts analysés pour la production de différents composts, avec des avantages relatifs pour le vermicompost (environ 18 kg CO₂eq/t de compost) par rapport à la production de compost solide (environ 37kg CO₂eq/t de compost) et au compost liquide (environ 48 kg CO₂eq/t de compost).

Les émissions de méthane et de protoxyde d'azote provenant du compostage sont de loin les sources d'émissions les plus importantes dans le résultat global. Les émissions dues à l'utilisation de combustibles fossiles, par exemple pour le transport des matières premières biogènes ou pour le fonctionnement du processus, sont plutôt secondaires par rapport aux émissions directes dues au compostage.

Le carbone, qui a été produit à partir du compost et dont la durée de vie est liée durable, contribue à réduire la quantité de CO₂ qui a été produite lors de l'épuisement de la biomasse utilisée et qui a été produite à partir du compost.

Les processus de compostage et l'application de compost aux sols agricoles interagissent avec l'environnement et le système climatique de multiples façons complexes, ce qui entraîne de nombreuses incertitudes.

Afin de réduire ces incertitudes à l'avenir et d'accroître la robustesse des résultats comptables, des mesures des valeurs d'émission réelles ou du carbone séquestré devraient être effectuées régulièrement au cours de la mise en œuvre et de l'exploitation des technologies étudiées en Madagascar

Table de matières

RESUME EXECUTIF	2
TABLE DE MATIÈRES.....	3
LISTE DES ABRÉVIATIONS	4
1 INTRODUCTION.....	5
Description des filières pertinentes pour la mise à disposition des composts.....	5
Concept A : compost liquide.....	6
Concept B : compost solide	7
Concept C : Vermicompost.....	8
2 METHODOLOGIE ET DEFINITIONS PRINCIPALES	9
Étape 1 : objectif et du champ de l'étude	9
Étape 2 : Inventaire - hypothèses et données d'entrée	10
Étapes 3 et 4 - Evaluation de l'impact et interprétation - résultats du bilan	12
Discussion des paramètres d'influence principaux et des incertitudes dans les résultats disponibles.....	14
3 DISCUSSION	16
BIBLIOGRAPHIE	18
ANNEXE	19
Compost liquide.....	19
Compost solide	20
Vermicompost	22
Resultats	23

Liste des abréviations

GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
BMZ	Federal Ministry for Economic Cooperation and Development
TPS	Terra Preta Substrat
GES	Gaz à effet de serre
ISO	International Organization for Standardization
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change

① Introduction

L'agriculture joue un rôle central dans l'État insulaire de Madagascar. Elle constitue l'une des bases de l'économie malgache. 80 % de la population des régions rurales du pays vivent de l'agriculture et de l'élevage (Rakotovo et al. 2017). Les surfaces forestières sont souvent en concurrence avec les surfaces de culture ou d'élevage (BMZ 2023). Parallèlement, la production agricole à Madagascar est vulnérable aux effets du changement climatique et à la perte croissante de fertilité et de carbone des sols. Utilisation des intrants chimique dans la production agricole augmente lentement. Par exemple, la quantité d'engrais utilisée était de 10,6 kg/ha sur les terres arables en 2020 et a augmenté de manière continue depuis 2000, avec de petites fluctuations (The World Bank 2023). Un potentiel d'amélioration des fonctions du sol est l'utilisation de biochar, qui a des effets positifs sur le bilan des nutriments et de l'eau, les réactions du sol, la fixation des polluants et la capacité de rendement des sols (Haubold-Rosar et al. 2016).- Cela améliore la structure et la capacité de rétention d'eau du sol, ce qui a un effet positif sur l'utilisation agricole.

En 2020, la majorité de l'énergie de Madagascar a été produite à partir de biocarburants et de déchets (321830 TJ), 32051 TJ à partir de pétrole, 4127 TJ à partir de charbon, 2391 TJ à partir d'énergie hydraulique et 84 TJ à partir d'énergie éolienne, solaire, etc. La part de l'énergie produite à partir de biocarburants et de déchets n'a cessé d'augmenter depuis 1990 (<https://www.iea.org/countries/madagascar>). Le potentiel de biomasse pour la production primaire nette d'énergie à Madagascar (10,5 tC/ha par an) est largement supérieur à la moyenne mondiale (3-4 tC/ha par an) (International Renewable Energy Agency 2022).

Selon la *Nationally Determined Contribution* (soumise à la CCNUCC en 2015), Madagascar a l'objectif de réduire les émissions nationales de GES de 14 % jusqu'à 2030. Pour atteindre cet objectif, des mesures telles que le reboisement, un meilleur suivi des forêts et des pâturages, des techniques de riziculture respectueuses du climat, une utilisation accrue de l'énergie hydraulique et solaire, des foyers de cuisson durables et une augmentation de l'efficacité énergétique sont prévues (USAID 2016).

Dans ce contexte, l'utilisation de ressources biogènes pour la production de substrats destinés à l'amélioration des sols constitue également une option intéressante pour maintenir la productivité agricole et créer des puits de carbone à Madagascar.

Table 1 Informations sur le pays

Superficie	112.622 km ²
Nombre d'habitants	28,9 Mio
Terres arables	24,8 %

Afin de réduire la perte croissante de carbone et de fertilité des sols sur les terres agricoles, il est possible de produire des substrats pour l'amélioration des sols à partir de ressources biogènes en utilisant différents procédés de fabrication. Pour Madagascar, des approches de production de composts à partir de différents résidus et déchets biogènes ont été étudiées. Dans ce cadre, un bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) résultant de la production des composts a été établi.

L'objectif du bilan GES était de déterminer les principaux facteurs d'influence et moteurs et de préparer des recommandations d'action pour la mise en œuvre de technologies et de concepts correspondants à Madagascar.

Description des filières pertinentes pour la mise à disposition des composts

Lors d'une phase de consolidation commune, des concepts appropriés pour la production de substrats destinés à l'amélioration des sols ont été identifiés et convenus avec différents experts locaux et collaborateurs de la GIZ. L'accent a été mis sur différents processus de compostage de résidus et de déchets biogènes. Au total, trois concepts prometteurs pour la production de compost ont été définis. Ils sont décrits ci-dessous.

Concept A : compost liquide

Le concept A décrit la production de compost liquide à partir de résidus biogènes à Madagascar. Le schéma de processus pour ce concept est présenté dans la **Error! Reference source not found.**

Pour le compostage, deux volumes d'eau sont mélangés à un volume de résidus biogènes. La part de résidus biogènes se compose à son tour d'une part de volume de bouse de vache et de deux parts de volume de matière verte organique. En fonction de l'emplacement, certains composants et résidus de pois d'Angole, de glébeux, de bananiers ou d'autres biomasses disponibles entrent en ligne de compte comme matière verte. L'eau nécessaire au compostage est puisée manuellement à l'aide de seaux dans des ruisseaux et des barrages situés dans un rayon de 100 m autour du site de compostage. La bouse de vache est collectée manuellement à l'aide de brochettes dans les environs immédiats. Les matières vertes organiques sont récoltées manuellement dans un rayon de 500 m et stockées dans un conteneur en plastique ou en béton avant le compostage.

Le compostage a lieu dans un bac en béton de 700 litres, qui est brassé manuellement tous les cinq à 21 jours.

La *Figure 1* montre, outre les sous-processus et les éléments du concept de production de compost liquide, les flux quantitatifs des principaux paramètres. Les paramètres de processus pour lesquels aucune donnée de processus n'était disponible et pour lesquels des hypothèses ont été faites sont représentés en bleu.

Le résultat du compostage est un substrat liquide qui est ensuite épandu sur les terres agricoles avoisinantes.

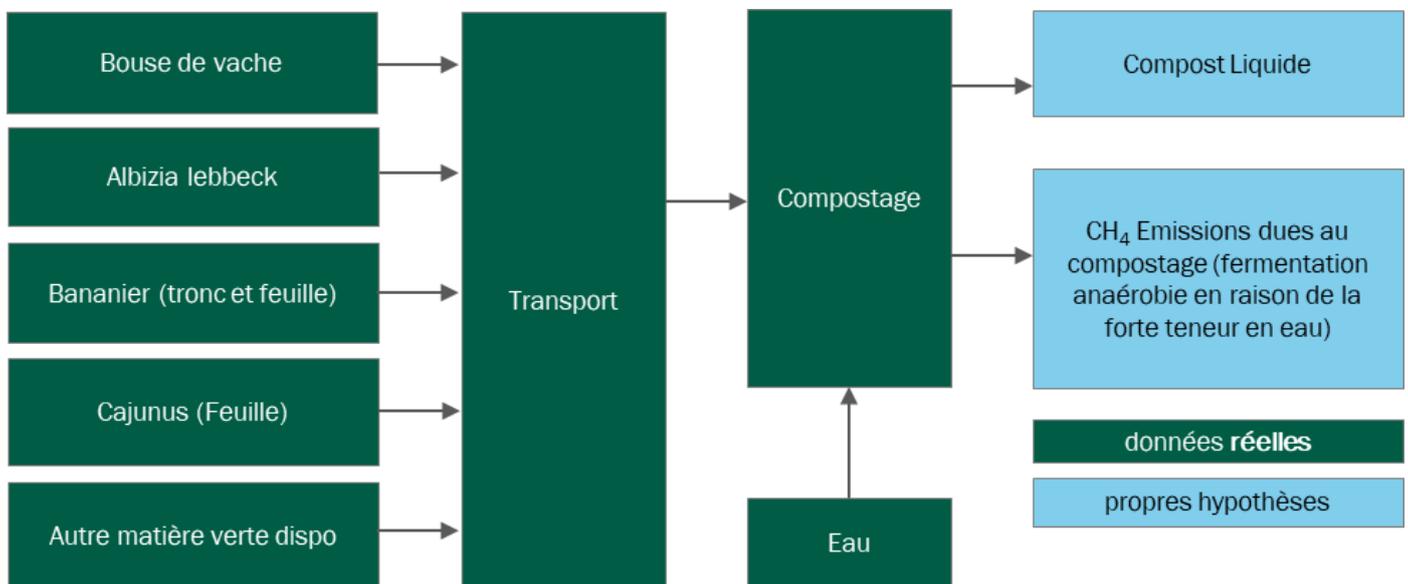


Figure 1 concept étudié pour la fourniture de compost liquide à Madagascar

Concept B : compost solide

Le deuxième concept étudié poursuit la production de composts solides à partir de différents résidus biogènes à Madagascar. Le schéma du processus pour ce concept est présenté dans la *Figure 2*. Pour le compostage, un conteneur en béton de 700 litres est rempli par couches de 10 cm de biomasse riche en azote et de 20 cm de biomasse riche en carbone jusqu'à ce qu'une hauteur totale de 1,5 m soit atteinte.

Le volume total se compose donc d'un tiers de biomasse riche en carbone et de deux tiers de biomasse riche en azote. La biomasse riche en carbone est constituée de feuilles, de foin, de paille, de restes de pommes de terre ou de tiges de maïs hachées. Comme source d'azote, on peut utiliser de l'herbe fraîche, des restes de plantes, du lisier frais ou du fumier sec. Toutes les matières premières biogènes sont récoltées manuellement dans un rayon de 100 m et sont en partie stockées à découvert sur une surface proche.

Comme dans le concept 1, la figure montre les principaux flux de quantités des paramètres de processus pertinents. Les paramètres de processus pour lesquels aucune donnée de processus n'était disponible et pour lesquels des hypothèses ont été faites sont représentés en bleu.

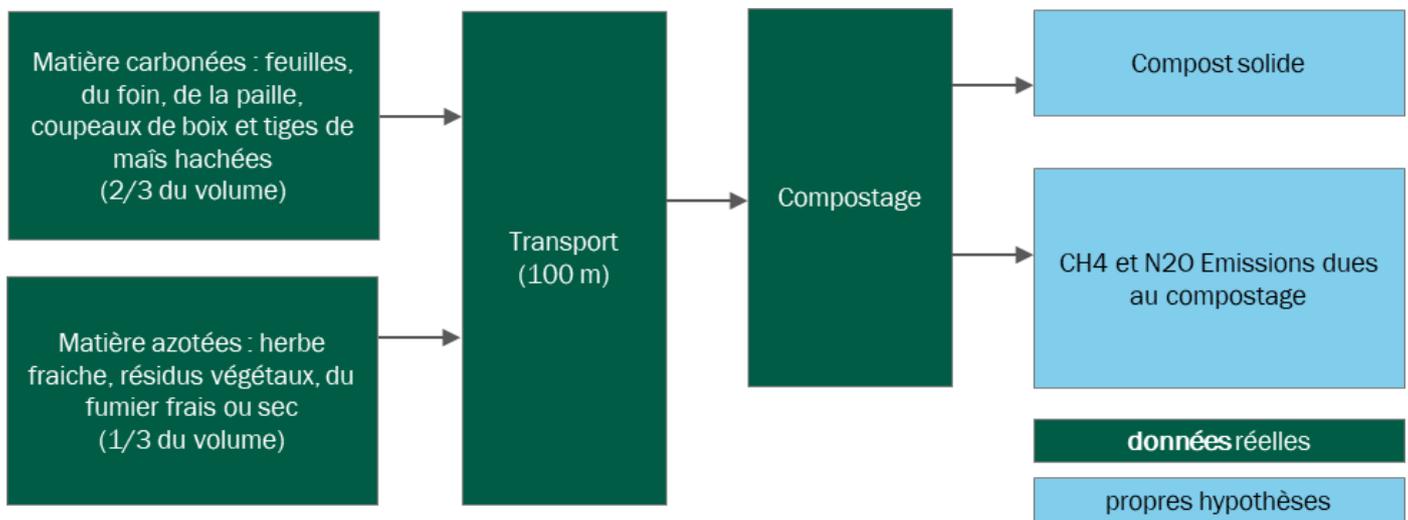


Figure 2 concept étudié pour la fourniture de compost solide à Madagascar

Concept C : Vermicompost

Le troisième concept étudié décrit la production de vermicompost à partir de résidus biogènes à Madagascar. Le schéma du processus pour ce concept est présenté dans la .

La première étape consiste à produire un activateur qui fournit des micro-organismes et des bactéries pour le compostage. Pour fabriquer l'activateur, environ 10 litres d'eau sont portés à ébullition avec 3 kg de son de riz et refroidis jusqu'au lendemain. Un autre bidon est mélangé à 5 litres de liquide de la panse du bœuf zébu et à 5 autres litres d'eau sucrée. Dès que le son de riz cuit a refroidi, il est mélangé au liquide de la panse et à l'eau sucrée et recouvert d'un sac pour assurer un léger apport d'oxygène. Le pré-compost fini peut être mélangé après 10 jours avec des matières vertes organiques disponibles et des vers de compost pour commencer le compostage. L'eau nécessaire est collectée manuellement avec des seaux dans un rayon de 500 m, le liquide de la panse de zébu est obtenu dans un abattoir. Les matières vertes à composter et le son de riz sont collectés dans un rayon de 500 m. Les déchets sont ensuite acheminés vers un centre de compostage.

Comme pour la représentation dans le concept 1, la montre les principaux flux de quantités des paramètres de processus pertinents. Les paramètres de processus pour lesquels aucune donnée de processus n'était disponible et pour lesquels des hypothèses ont été faites sont représentés en bleu.

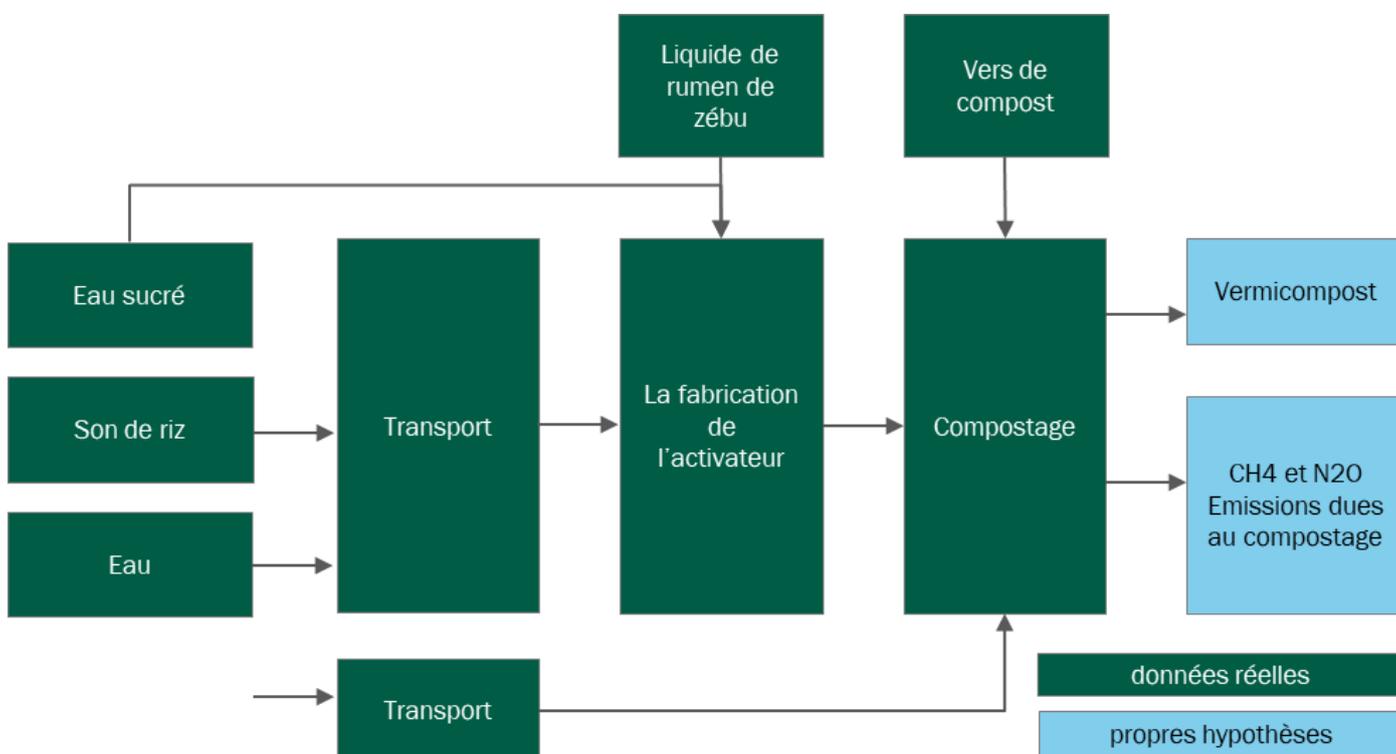


Figure 3 concept étudié pour la fourniture de vermicompost à Madagascar

② Méthodologie et définitions principales

Afin d'établir un bilan des émissions liées à la production de différents composts à partir de résidus biogènes, un bilan GES a été réalisé sur la base méthodologique de l'analyse du cycle de vie (ACV). Les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044 s'appliquent à l'analyse du cycle de vie.

Selon les normes en vigueur, la procédure d'établissement du bilan se compose de quatre étapes partielles (voir *Figure 4*). Selon de ces étapes partielles, des décisions et des définitions méthodologiques sont nécessaires. Les points essentiels sont décrits dans les paragraphes suivants.

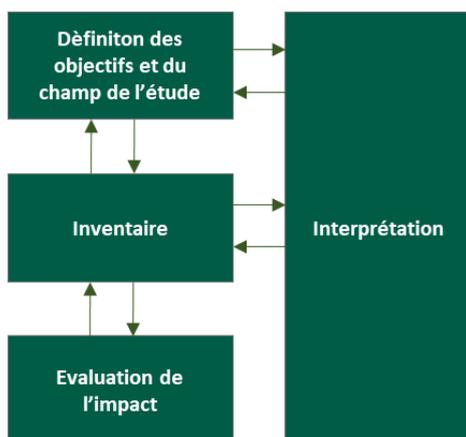


Figure 4 Composants de l'analyse du cycle de vie selon la norme ISO 14040

Étape 1 : objectif et du champ de l'étude

Cadre d'établissement du bilan

Outre les processus de mise à disposition de la biomasse et de compostage présentés dans les figures 1-3, les limites du système de comptabilisation des GES englobent également l'utilisation du compost dans l'agriculture. Cela prend en compte essentiellement le transport

du compost vers le lieu d'application et la mise à disposition d'éléments nutritifs disponibles pour les plantes sous forme d'engrais.

Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle est une unité de comparaison qui décrit l'utilité du système. Dans le cas présent, l'utilité est la mise à disposition de compost comme amendement. Une tonne de compost a été choisie comme unité de référence. Tous les intrants et les extrants ainsi que leurs effets sont rapportés à cette grandeur de référence.

Crédits

Le calcul se focalise sur le produit principal défini, à savoir 1 tonne de compost comme substrat pour améliorer la qualité du sol. La valeur ajoutée du compost réside dans la mise à disposition d'éléments nutritifs disponibles pour les plantes et la substitution d'engrais synthétiques qui en découle. Il existe différentes méthodes pour attribuer l'impact environnemental associé au produit principal au prorata (ISO 14040). Dans le cas présent, la méthode des crédits¹ a été choisie. Dans cette approche, les économies d'émissions dues aux avantages supplémentaires générés (par exemple, les émissions évitées grâce à la substitution des engrais synthétiques) sont déduites des émissions totales du système de produits. En appliquant la méthode des crédits, l'influence de l'avantage supplémentaire peut être directement lue dans un diagramme à barres.

Évaluation de l'impact

La présente évaluation des concepts de production de compost tient uniquement compte de la catégorie d'impact potentiel de réchauffement global (PRG). Au sein de la catégorie PRG, les gaz à effet de serre pertinents sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Le potentiel de réchauffement planétaire des gaz à effet de serre est exprimé en kg d'équivalents de dioxyde de carbone (CO₂eq). Pour convertir une masse donnée de méthane en kg de CO₂eq, le poids du méthane est multiplié par 28 et celui du protoxyde d'azote par 265 (sur la base d'une période de 100 ans selon le GIEC 2013) (Stocker et al. 2013).

¹ Le concept de crédits, tel qu'il est décrit dans cette section pour l'ACV, ne doit pas être confondu avec le concept de certificats de crédit carbone, qui vise à valoriser les mesures de réduction des émissions réalisées par un projet ou une activité spécifique dans un autre secteur industriel.

Étape 2 : Inventaire - hypothèses et données d'entrée

L'inventaire physique comprend tous les intrants et les extrants du système de produits, y compris les matières premières et les matériaux, les flux d'énergie, l'eau et les émissions dans l'air, l'eau et le sol. Les sections suivantes décrivent en détail les bases de données et les hypothèses utilisées pour calculer les émissions de GES liées à la production des différents composts.

Les données d'entrée pour l'établissement du bilan ont été rassemblées à partir de différentes sources de données. Le point de départ de la collecte de données a été un questionnaire auquel ont répondu des experts locaux et des collaborateurs ou partenaires de la GIZ. Celui-ci a été complété par des données issues de la littérature ou de projets de recherche ayant des contenus de travail comparables.

Le *Table 2* suivant résume les sources essentielles pour les données d'entrée des différentes étapes partielles de la chaîne de processus vers le compostage.

Dans la catégorisation des sources de données, il convient de faire une distinction entre les informations sur la consommation de certaines matières premières (par exemple le diesel), les émissions directes (par exemple dues à la combustion du diesel) dans les processus de production du compost et les émissions de la chaîne en amont résultant de la fourniture de ces matières premières. Alors que les informations sur les émissions de la chaîne en amont des intrants utilisés proviennent principalement de la base de données ACV Ecoinvent, les données relatives à la consommation et aux émissions directes au cours des étapes du processus considéré proviennent de la feuille de collecte de données interne et des autres sources de données citées dans le présent document.

Les données principales d'entrée et hypothèses pour l'établissement du bilan se trouvent dans l'annexe.

Table 2 Principales sources des données d'entrée pour les différentes étapes du processus

Compost liquide	Transport	Production d'activateurs	Compostage	Application
Feuille de collecte de données	X			X
KtBL ²			X	
Base de données DBFZ			X	X
Project Lab-Togo ³	X			
Doussou, 2019				X
Compost solide				
Feuille de collecte de données	X			X
Ecoinvent 3.9 ⁴			X	
Base de données DBFZ			X	X
Project Lab-Togo	X			
Doussou, 2019				X
Vermicompost				
Feuille de collecte de données	X			X
Ecoinvent 2.2 et 3.9			X	
Base de données DBFZ			X	X
Projet Lab-Togo	X			
Doussou, 2019				X
Hypothèse propre		X		

Transport

Les distances de transport des substrats jusqu'à le lieu de production et de transport du compost jusqu'à le champs agricole ont été fournies par la feuille de collecte de données. Le transport a été supposé effectué par un Tricycle. Les données relatives au carburant et à la consommation de carburant sont basées sur le projet de recherche Lab Togo⁵.

² <https://www.ktbl.de/webanwendungen>

³ <https://www.dbfz.de/en/press-media-library/press/press-releases/press-release-23072020>

⁵ <https://www.dbfz.de/en/press-media-library/press/press-releases/press-release-23072020>

Compostage

Le compostage est l'une des technologies les plus réalisables pour la gestion des déchets biogènes, qui permet de recycler les nutriments organiques et de les réutiliser comme engrais pour les processus de culture. Mais pendant le compostage, des gaz à effet de serre à fort PRP tels que N_2O et CH_4 peuvent être émis en raison de la dégradation organique, en particulier en raison de la dégradation rapide de la matière organique azotée et de la présence de zones anaérobies.

Les émissions de méthane (CH_4) et de protoxyde d'azote (N_2O) pendant le compostage ont été prises en compte pour les concepts de vermicompost et de compost solide. Selon Yasmin et al. (2022) et Nigussie et al. (2016), les émissions liées au climat survenant pendant le compostage peuvent être réduites dans le cas du vermicompostage. La réduction des émissions de CH_4 est principalement due aux conditions aérobies à l'intérieur du vermicomposteur, qui sont maintenues par l'activité de foussement des vers dans le compost. Selon l'hypothèse de Nigussie et al. (2016), les émissions de N_2O sont réduites de 40% et les émissions de CH_4 de 32% par rapport à la méthode de compostage conservatoire dans ce cas de calcul. La marge de variation des émissions pour le compostage conservateur (compost solide) provient aussi bien de la base de données DBFZ que du Swiss centre for life cycle inventories (2010) et du Swiss centre for life cycle inventories (2022). Une valeur moyenne a été utilisée pour le présent calcul. Les données sont listées dans la *Table 7* de l'annexe et sont évaluées et discutées dans le chapitre des résultats. Pour le concept de compost liquide, on part d'une situation de fermentation anaérobie similaire au stockage fumier de ferme en raison de la forte teneur en eau. Pour les émissions de CH_4 qui en résultent, une valeur moyenne de la marge de variation recherchée a été utilisée dans le cadre de la étude présente. La fourchette est basée sur les informations de KTBL (2018), Haenel et al. (2014) et Zeeman und Gerbens (voir également la *Table 5* de l'annexe).

Calcul des crédits pour la substitution des engrais industriels par les éléments fertilisants contenus dans le compost

Les éléments fertilisants disponibles pour les plantes contenus dans le compost, à savoir K_2O , P_2O_5 et N, peuvent réduire les besoins en engrais synthétiques. Les crédits de GES qui en résultent, résultent des dépenses évitées pour la production d'engrais synthétiques. Pour

calculer les crédits, la quantité d'éléments nutritifs est multipliée par le facteur d'émission de l'engrais correspondant. Les facteurs d'émission pour la production d'engrais synthétiques sont tirés de Commission Européenne (2018) et sont listés dans la *Table 5* de l'annexe.

Reproduction de l'humus Potentiel et séquestration possible du carbone par le compost

Les substances organiques contenues dans le compost sont constituées de composants facilement dégradables et de composants produisant de l'humus. Les fractions facilement dégradables des substances organiques primaires sont utilisées comme source de nourriture et d'énergie par les organismes hétérotrophes du sol dans un court laps de temps (généralement au cours de l'année d'application), et sont ainsi respirées pour former du dioxyde de carbone. La matière organique humifère du compost est métabolisée en humus par les organismes du sol et est ensuite principalement incorporée dans la matière organique stabilisée du sol, qui n'est dégradée que progressivement au cours des années qui suivent l'épandage de la matière organique primaire. Ainsi, en particulier sur les sites pauvres en humus, on peut s'attendre à ce que l'application de compost entraîne un enrichissement significatif de l'humus, ce qui est important pour la production agricole (Reinhold 2008). Les applications de compost dans l'agriculture peuvent apporter une contribution importante à la reproduction de l'humus, mais il n'est pas possible de refléter ces avantages dans le bilan des GES sans tenir compte des années qui suivent l'application, en ce qui concerne les processus de culture, les rendements et l'utilisation d'engrais, etc.

On suppose toutefois (Smith et al. 2001) qu'une petite partie du carbone appliqué avec le compost est stockée. Ainsi, pour l'application des composts en agriculture, la possibilité de stockage du carbone (puits de carbone) peut également être envisagée. Cette approche est également utilisée par Dehoust et al. 2010. A cette fin, 8% du carbone lié au compost est pris en compte, pour lequel il est supposé qu'il reste stocké dans le sol sur un horizon de 100 ans. Cela signifie que le carbone séquestré pendant la croissance de la plante est stocké et donc retiré de l'atmosphère et peut être pris en compte par le biais d'un crédit de CO_2 . Pour calculer les crédits de GES, la quantité de carbone décomposable est multipliée par le facteur de conversion du CO_2 de $3,67 \text{ gCO}_2/\text{g C}$.

Jusqu'à présent, cependant, aucune étude à suffisamment long terme n'a été réalisée pour prouver que l'application du compost dans l'agriculture entraîne réellement un stockage à long terme du carbone et contribue ainsi à la protection du climat. Pour montrer les effets possibles sur le bilan des gaz à effet de serre, on a supposé que l'application de compost permettait de stocker du carbone, malgré les incertitudes. Pour le présent calcul, une valeur moyenne de la teneur totale en carbone a été utilisée.

Étapes 3 et 4 - Evaluation de l'impact et interprétation - résultats du bilan

Les résultats du calcul des émissions de gaz à effet de serre pour les concepts de compostage sont représentés par trois graphiques dans chacune des figures 1 à 3 et sont expliqués ci-dessous. Il s'agit de:

- graphique (A) : émissions dues aux processus de transport et au compostage ;
- graphique (B) : crédits pour la substitution des engrais synthétiques ;
- graphique (C) : somme et total des émissions.

Émissions pour le concept de mise à disposition de compost liquide

Les émissions de méthane provenant du compostage (représentées par le segment de colonne coloré en rose) ont le plus grand impact sur les émissions de GES liées à la production du compost (voir *Figure 5*, graphique (A)). En revanche, les émissions dues à l'utilisation de combustibles fossiles (diesel) pour les processus de transport et d'exploitation (en gris) ont tendance à perdre de l'importance par rapport aux émissions directes dues au compostage.

La méthode d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre décrite ci-dessus donne lieu à des crédits pour les effets positifs de la séquestration du carbone et de l'apport de nutriments. Les valeurs des crédits calculés sont présentées dans la *Figure 5*, graphique (B). Le crédit pour l'apport de nutriments et la substitution des engrais synthétiques qui en découle s'élève au total à -5,3 kgCO₂eq/t de compost pour les 3 types d'engrais. Ce-

pendant, le crédit pour le stockage du carbone représente de loin la plus grande partie du crédit total, avec -25 kgCO₂eq/t de compost (segment marqué en vert).

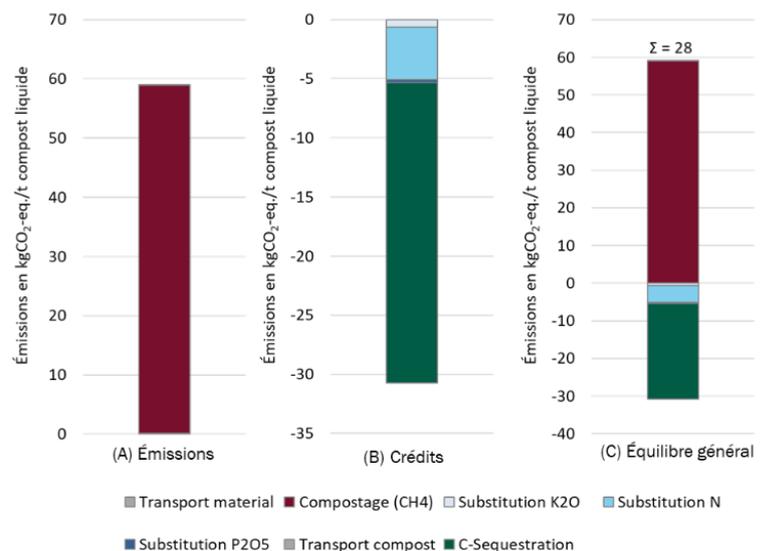


Figure 5 Résultats du calcul des émissions de gaz à effet de serre pour A) les émissions de GES dues aux processus de transport et de compostage ; B) les crédits de GES pour la substitution des engrais synthétiques ; C) la somme et les émissions totales

Les émissions totales de GES sont calculées comme la somme des émissions (graphique A) et des crédits accordés (graphique B). Le résultat est présenté dans la colonne des totaux de la *Figure 5*, graphique (C) et montre l'influence significative des crédits d'émissions de méthane provenant du compostage, pour lequel on suppose une situation de décomposition anaérobie en raison de la forte teneur en eau. La valeur des émissions totales est de 28 kg CO₂eq/t de compost, compte tenu des hypothèses retenues. Les principaux facteurs d'influence et les incertitudes liées au calcul des émissions dues au compostage seront décrits et discutés plus tard.

Compost solide

Comme pour le concept de compost liquide, les émissions de GES dues au compostage (en rose) ont la plus grande influence sur les émissions de GES (, graphique (A)). Les émissions dues à l'utilisation de combustibles fossiles (diesel) pour les processus de transport et d'exploitation (en gris) sont, dans ce cas également, plutôt faibles par rapport aux émissions directes dues au compostage. Les valeurs des crédits calculés sont présentées dans la , graphique (B). Le crédit pour l'apport d'éléments nutritifs et la substitution des engrais synthétiques qui en découle s'élève au total pour les 3 types d'engrais à -17 kgCO₂eq/t de compost. Les crédits pour la séquestration de carbone sont de -25 kgCO₂eq/t de compost (segment marqué en vert).

Les émissions totales de GES sont calculées comme la somme des émissions (graphique A) et des crédits accordés (graphique B). Le résultat est présenté dans la colonne des totaux de la graphique (C) et montre l'influence significative des émissions de méthane et de protoxyde d'azote provenant du compostage. La valeur des émissions totales est de 37 gCO₂eq/t de compost, compte tenu des hypothèses retenues. Les facteurs principaux d'influence et les incertitudes liées au calcul concernant les émissions dues au compostage et les crédits pour la substitution d'engrais synthétiques seront décrits et discutés plus en détail ultérieurement.

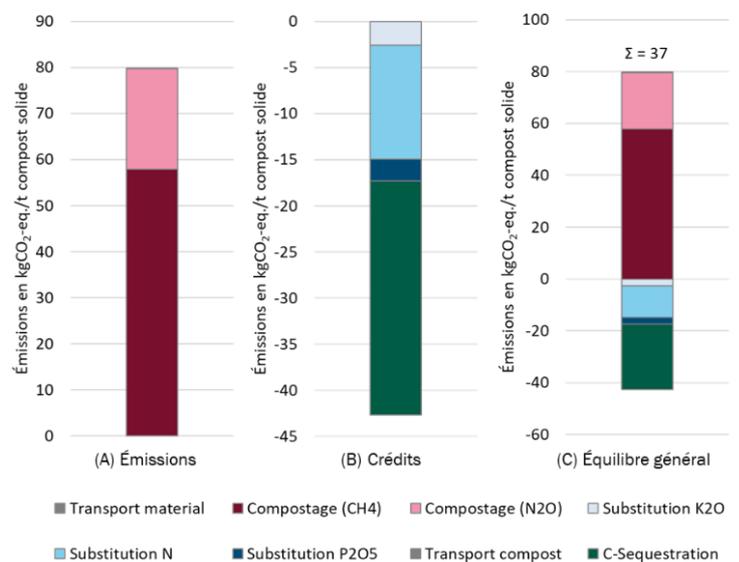


Figure 6 Résultats du calcul des émissions de gaz à effet de serre pour A) les émissions de GES dues aux processus de transport et de compostage ; B) les crédits de GES pour la substitution des engrais synthétiques ; C) la somme et les émissions totales

Vermicompost

Dans le cas de la fourniture de vermicompost, la plus grande partie des émissions de GES est également liée au compostage. Toutefois, les émissions de N₂O et de CH₄ correspondantes sont nettement inférieures à celles du compost solide.

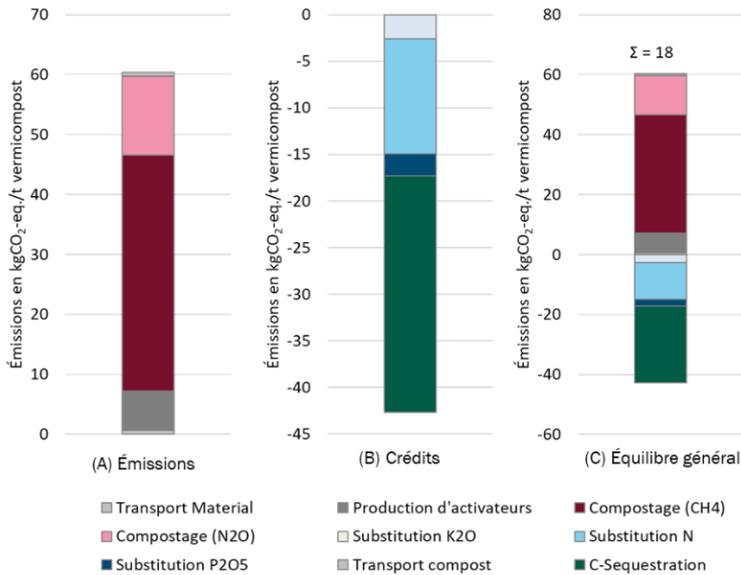


Figure 7 Résultats du calcul des émissions de gaz à effet de serre pour A) les émissions de GES dues aux processus de transport et de compostage ; B) les crédits de GES pour la substitution des engrais synthétiques ; C) la somme et les émissions totales

Les émissions dues à l'utilisation de combustibles fossiles et du mix électrique pour les processus de transport et d'exploitation sont certes faibles dans ce cas également par rapport aux émissions directes dues au compostage, mais elles représentent une part nettement plus importante des émissions totales en raison des émissions de GES dues à la préparation de l'activateur que, par exemple, pour le compost solide comparable (Figure 7, Graph A). Les valeurs des crédits calculés sont présentées dans la Figure 7, graphique (B).

Le crédit pour l'apport d'éléments fertilisants et la substitution des engrais synthétiques qui en découle est de -17 kgCO₂e/tonne de compost au total pour les 3 types d'engrais. Les crédits pour la séquestration de carbone sont de -25 kgCO₂e/t de compost (en vert).

Les émissions totales de GES, en tant que somme des émissions (graphique A) et des crédits octroyés (graphique B), s'élèvent à 18 gCO₂e/tonne de compost (graphique C), selon les hypothèses retenues. Suite à

une meilleure aération due à l'activité des vers, les émissions directes du compostage sont réduites et sont donc nettement inférieures à la valeur pour le compost solide. Les facteurs principaux d'influence et les incertitudes liées au calcul concernant les émissions dues au compostage et les crédits pour la substitution d'engrais synthétiques seront décrits et discutés plus tard.

Discussion des paramètres d'influence principaux et des incertitudes dans les résultats disponibles

Émissions de méthane issues de la digestion anaérobie (compost liquide)

Comme décrit précédemment, la production de compost liquide suppose une situation de dégradation anaérobie, similaire au stockage d'fumier de ferme, en raison de la forte teneur en eau.

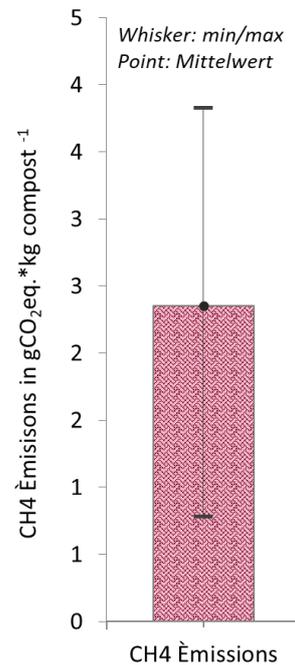


Figure 8 fourchettes d'émissions dues au compostage résultant des incertitudes des données d'entrée

Deux facteurs sont déterminants pour le calcul des émissions dues au stockage des fumier de ferme, d'une part le taux spécifique maximal de formation de méthane (B_0 - biodegradability of manure) et le facteur de

conversion du méthane (MCF – methane conversion factor). Le FCM indique la part de B0 effectivement produite dans différents systèmes de stockage. Dans la littérature, on trouve différentes indications concernant la valeur de ces paramètres. La marge de variation de la *Table 5* montre les écarts importants par rapport à la valeur moyenne utilisée ici. En raison du fait que les émissions de CH₄ calculées ont une grande influence sur les émissions totales de GES, il est nécessaire de déterminer ou de mesurer les paramètres d'influence afin de réduire la fourchette pour garantir la robustesse du résultat à l'avenir.

Fourchette des émissions directes de GES dues au compostage (solid compost)

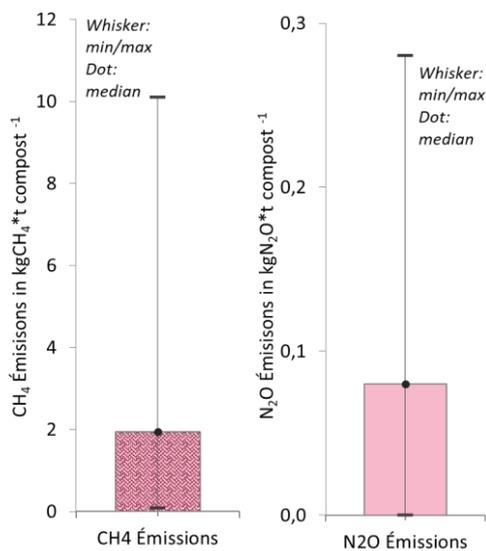


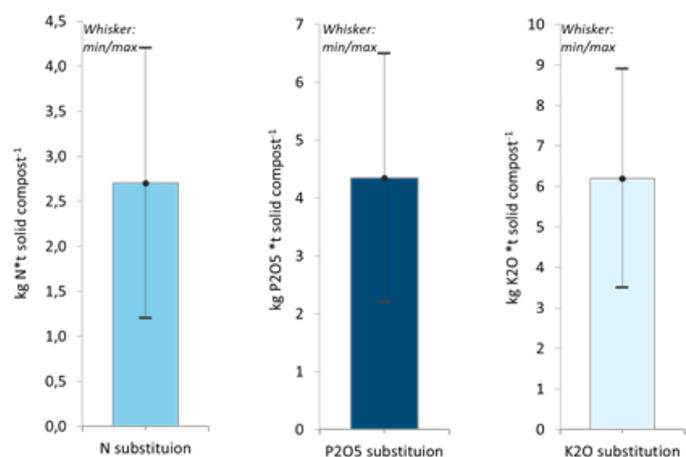
Figure 9 Marge de variation d'émissions dues au compostage résultant des incertitudes des données d'entrée. Figure de gauche : fourchette des émissions de CH₄, figure de droite : fourchette des émissions de N₂O émissions de méthane issues de la digestion anaérobie (compost liquide)

Les résultats du bilan montrent la grande importance du processus de compostage par rapport aux émissions totales. Ainsi, la conception du procédé de ce processus détermine directement le niveau des émissions du processus de compostage. La pollution de l'environnement peut résulter, entre autres, des émissions de gaz. La quantité et la composition des gaz émis dépendent des matières à composter et des conditions de compostage. Cela signifie essentiellement que l'aération et la composition du matériau de compostage déterminent l'émission de gaz traces ayant un impact sur le climat, comme le méthane et le protoxyde d'azote. Lorsque l'apport

d'oxygène est suffisant, par exemple en retournant fréquemment le tas de compost, la formation de dioxyde de carbone domine. Le CO₂ biogénique émis n'est toutefois pas comptabilisé, car le CO₂ biogénique est absorbé par l'atmosphère pendant la croissance de la biomasse (Solomon et al. 2007). En cas d'apport insuffisant d'oxygène, c'est la formation de méthane qui commence. Les émissions de méthane et de protoxyde d'azote provenant du compostage peuvent fortement influencer les émissions totales de GES dues à la production de compost, comme le montre la *Figure 9*. L'incertitude liée à l'hypothèse des émissions est illustrée par la fourchette présentée à la *Figure 10*, qui se base sur des données de mesures d'émissions. Dans des conditions de compostage défavorables, les émissions peuvent être multipliées. Pour une plus grande précision et certitude concernant les émissions liées au climat provenant du compostage, il est toutefois nécessaire d'analyser les matériaux à composter et les conditions de compostage existantes, notamment en ce qui concerne l'aération du tas de compost.

Fourchette des teneurs en éléments nutritifs dans le compost solide et le vermicompost

Les éléments nutritifs contenus dans le compost peuvent remplacer les engrais synthétiques lorsqu'ils sont utilisés dans la production agricole. Pour décrire ces effets, les données disponibles ont permis de recourir à des valeurs bibliographiques. Les marges de variation pour les quantités de nutriments N, K₂O et P₂O₅, qui dépendent en premier lieu de la biomasse à composter, sont représentées dans la *Figure 10* et montrent l'incertitude liée à l'application de ces valeurs. Ces incertitudes pourront



être réduites à l'avenir par des mesures.

Figure 10 gamme des teneurs possibles en éléments nutritifs et du potentiel de substitution des engrais synthétiques qui en découle

③ Discussion

Les résultats du bilan GES réalisé montrent des émissions de GES globalement faibles pour les concepts analysés pour la production de différents composts, avec des avantages relatifs pour le vermicompost (environ 18 kg CO₂e/t de compost) par rapport à la production de compost solide (environ 37kg CO₂e/t de compost) et au compost liquide (environ 48 kg CO₂e/t de compost).

Les émissions de méthane et de protoxyde d'azote provenant du compostage sont de loin les sources d'émissions les plus importantes dans le résultat global. Les émissions dues à l'utilisation de combustibles fossiles, par exemple pour le transport des matières premières biogènes ou pour le fonctionnement du processus, sont plutôt secondaires par rapport aux émissions directes dues au compostage.

Les différences dans le niveau des émissions directes du compostage sont principalement dues au mode de fonctionnement des processus de compostage et aux parts d'émissions de méthane ou de protoxyde d'azote. La dégradation ou la transformation de la biomasse introduite en compost se fait en partie dans des conditions anaérobies en raison de la plus grande proportion d'eau dans la production de compost liquide. Cela explique par exemple la différence relative par tonne de compost entre le compost solide et le vermicompost. Dans ce dernier, l'activité biologique des vers garantit une plus grande aération et il y a comparativement moins de zones anaérobies dans lesquelles se produit la formation de méthane.

Les résultats du vermicompost et du compost solide ne sont que très partiellement comparables à ceux du compost liquide. La raison en est la teneur en eau nettement plus élevée par tonne de compost liquide et la proportion relativement plus faible de matières solides par tonne de compost.

Outre les domaines d'émissions identifiés le long de la chaîne de processus, le résultat montre également une influence importante de la séquestration du carbone

dans le bilan global. Le carbone apporté et séquestré durablement, principalement par le compost, donne lieu à un crédit pour la quantité de CO₂ séquestrée lors de la croissance de la biomasse utilisée et apportée au sol par le compost.

Les processus de compostage et l'application de compost aux sols agricoles interagissent avec l'environnement et le système climatique de multiples façons complexes, ce qui entraîne de nombreuses incertitudes. Il s'ensuit que les principaux facteurs influençant le résultat global, le crédit pour le piégeage du carbone et les émissions dues au compostage, sont associés à de grandes incertitudes. La littérature montre des fourchettes de résultats élevées pour les deux paramètres ou, dans le cas du stockage du C, il n'est pas encore définitivement établi si l'utilisation du compost peut entraîner un stockage à long terme. Afin de réduire ces fourchettes et incertitudes à l'avenir et d'augmenter encore la robustesse des résultats du bilan, des mesures des valeurs d'émission réelles ou du carbone séquestré devraient être effectuées régulièrement lors de la poursuite de la mise en œuvre et de l'exploitation des technologies étudiées à Madagascar. Ces valeurs peuvent être intégrées dans le bilan et augmenter ainsi la pertinence des résultats. Les émissions issues des processus de compostage sont un facteur d'influence essentiel dans le résultat global de tous les concepts faisant l'objet d'un bilan. La littérature montre des fourchettes de résultats élevées pour les émissions possibles de ces processus. Afin de réduire ces fourchettes à l'avenir et d'augmenter encore la robustesse des résultats du bilan, des mesures des valeurs d'émission réelles devraient être effectuées régulièrement lors de la poursuite de la mise en œuvre et de l'exploitation des technologies étudiées à Madagascar. Ces valeurs peuvent être intégrées dans le bilan et augmenter ainsi la pertinence des résultats.

Les concepts étudiés pour la production de compost se caractérisent par un recours important au travail manuel ou un degré de mécanisation relativement faible. Cela signifie également que différentes interactions peuvent être liées à une augmentation potentielle du degré de mécanisation à l'avenir. Il s'agit notamment d'aspects positifs tels qu'une plus grande valeur ajoutée et une production accrue de composts.

D'un autre côté, l'augmentation du degré de mécanisation peut aussi accroître la consommation relative de sources d'énergie telles que l'électricité et le diesel par tonne de compost produite et, partant, entraîner une

augmentation relative des émissions de GES. Ces interactions devraient éventuellement être étudiées plus en détail à une date ultérieure.

Bibliographie

BMZ (2023): *Madagaskar. Naturparadies in schwieriger Lage*. Hg. v. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. <https://www.bmz.de/de/laender/madagaskar>, 31.01.2023.

Dehoust, Günther; Schüler, Doris; Vogt, Regine; Giegrich, Jürgen (2010): *Climate Protection Potential in the Waste Management Sector. Examples: Municipal Waste and Waste Wood*. Report No. (UBA-FB) 001347/E. Hg. v. UBA

ISO 14040, 2006: *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040:2006)*, Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006, 10/2006.

ISO 14044, 2006: *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)*, German and English Version EN ISO 14044:2006, 10/2006.

European Commission (2018): *DIRECTIVE (EU) 2018/ 2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL - of 11 December 2018 - on the promotion of the use of energy from renewable sources 2018*.

Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Dämmgen, U.; Poddey, E.; Freibauer, A.; Wulf, S. et al. (2014): *Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2012*. Thünen Report 17. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig.

Haubold-Rosar, M.; Heinkele, T.; Rademacher, A.; Kern, J.; Dicke, C.; Funke, A. et al. (2016): *Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer "veränderter" Biomasse als Bodenhilfsstoffe für die C-Sequestrierung in Böden*. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_04_2016_chancen_und_risiken_des_einsatzes_von_biokohle.pdf, 07.03.2023

International Energy Agency: *Madagascar. Country Profile. Energy Supply by source*. <https://www.iea.org/countries/madagascar>, 31.01.2023

International Renewable Energy Agency (2022): *Energy Profile. Madagascar*. IRENA, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Statistics/Statistical_Profiles/Africa/Madagascar_Africa_RE_SP.pdf, dernière vérification le 31.01.2023.

KTBL (2018): *Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau*. Online verfügbar unter <https://www.ktbl.de>, dernière vérification le 15.03.2018.

Nigussie, Abebe; Kuyper, Thomas W.; Bruun, Sander; Neergaard, Andreas de (2016): *Vermicomposting as a technology for reducing nitrogen losses and greenhouse gas emissions from small-scale composting*. In: *Journal of Cleaner Production* 139, S. 429–439. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.08.058.

Rakotovo, Narindra H.; Razafimbelo, Tantely M.; Rakotosamimanana, Stephan; Randrianasolo, Zafyson; Randriamalala, Josoa R.; Albrecht, Alain (2017): *Carbon footprint of smallholder farms in Central Madagascar. The integration of agroecological practices*. In: *Journal of Cleaner Production* 140, S. 1165–1175. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.045

Reinhold, Jürgen (2008): *Nutzen und Grenzen der Anwendung von organischen Reststoffen (organische Primärsubstanzen) zur Humusanreicherung in landwirtschaftlichen Böden – eine ingenieurtechnische Betrachtung*. Humusversorgung von Böden in Deutschland. Hg. v. UBA

Smith, Alison; Brown, Keith; Ogilvie, Steve; Rushton, Kathryn; Bates, Julia (2001): *Waste management options and climate change. Final report to the European Commission*. DG Environment. Hg. v. European Commission

Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B. et al. (2007): *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Hg. v. Cambridge University Press. IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York, USA

Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.) (2013): *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Hg. v. Cambridge University Press. IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

Sparrevik, Magnus; Adam, Chris; Martinsen, Vegard; Jubaedah; Cornelissen, Gerard (2015): *Emissions of gases and particles from charcoal/biochar production in rural areas using medium-sized traditional and improved "retort" kilns*. In: *Biomass and Bioenergy* 72, S. 65–73. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.11.016.

Swiss centre for life cycle inventories (2010): *Ecoinvent v2.2 for Umberto*. Version.

Swiss centre for life cycle inventories (2022): *Ecoinvent v3.9.1 for Umberto*. Version.

The World Bank: *Fertilizer consumption (kilograms per hectare of arable land)*. Madagascar. Food and Agriculture Organization. Disponible en ligne sur <https://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.ZS?end=2020&locations=MG&start=1961&view=chart>, zuletzt geprüft am 31.01.2023.

USAID (2016): *Greenhouse Gas Emissions in Madagascar*. Online verfügbar unter https://www.climatelinks.org/sites/default/files/asset/document/GHG%20Emissions%20Factsheet%20Madagascar_07_08_2016_edited_rev08-18-2016.pdf, dernière vérification le 31.01.2023.

Yasmin, Naushin; Jamuda, Milleni; Panda, Alok Kumar; Samal, Kundan; Nayak, Jagdeep Kumar (2022): *Emission of greenhouse gases (GHGs) during composting and vermicomposting. Measurement, mitigation, and perspectives*. In: *Energy Nexus* 7 (7), S. 100092. DOI: 10.1016/j.nexus.2022.100092.

Zeeman, Grietje; Gerbens, Sybren: *CH 4 EMISSIONS FROM ANIMAL MANURE. Background paper - CH4 Emission from animal manure. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. In: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*.

Annexe

Table 3 Facteurs d'émission

	Unité	Valeur	Source
Diesel	kgCO ₂ -eq./kg	3,14	RED II
électricité	gCO ₂ -eq./kWh	464,8	Ecoinvent 3.9
Engrais N	kgCO ₂ -eq./kg	4,57	RED II
Engrais K ₂ O	kgCO ₂ -eq./kg	0,417	RED II
Engrais P ₂ O ₅	kgCO ₂ -eq./kg	0,542	RED II

Compost liquide

Table 4 Données d'entrée du compost liquide

Processus			Transport	Compostage	Transport	Application
Mise	Unité					
Bouse da vache	Kg	85				
Albizia lebeck; Banancier; Caju- nus; autre matière verte dispo	Kg	67,2				
	Km		0,05 -0,5		0,5	
Besoin en diesel	l/km		0,028			
Eau	L	532				
Manuel						
Diesel	MJ			9,364		
Électricité	kWh			0,263		
moyens de com- postage	Kg			152		
résultat						
Compost	Kg			663,00		
CH ₄ Bouse da vache	Kg			0,544		
CH ₄ Déchets verts	Kg			0,743		
N (disponible sur) kg/tFM						0,644
P ₂ O ₅ kg/tFM						0,533
K ₂ O kg/tFM						1,012

Table 5 Données d'entrée et fourchettes d'émissions de CH₄ issues de la digestion anaérobie

		max	min	Valeur moyenne
Compost	kg			
CH ₄ Bouse da vache	kgCH ₄ / t Input	10,2	2,6	6,4
CH ₄ Déchets verts	kg CH ₄ / t Input	18,9	3,2	11,05

Compost solide

Table 6 Données d'entrée du compost solide

Processus		Biomass	Transport	Compostage	Transport	Application
mise	Unité					
Matière carbonées : feuilles, du foin, de la paille, coupes de bois et tiges de maïs hachées	kg	900				
Matière azotées : herbe fraîche, résidus végétaux, du fumier frais ou sec	kg	450				
	km		0,1		20	
Besoin en diesel	l/km		0,028			
Eau	l					
Diesel	MJ			83,164		
Électricité	kWh			2,335		
moyens de compostage	kg			1350		
Compost	kg					
résultat						
Compost	kg			597,35		
CH ₄	kg			1,165		
N ₂ O	kg			0,049		
N (disponible sur) kg/tFM						1,613
P ₂ O ₅ kg/tFM						2,598
K ₂ O kg/tFM						3,704

Table 7 Données d'entrée et fourchettes d'émissions de CH₄ et N₂O provenant du compostage (compost solide et vermicompost)

Compostage					
Source		Valeur moyenne	min	max	Valeur médiane
mise	unité				
Biomass (ratio 2:1)	kg	2	2	2	2
Diesel	MJ	0,12	0,00	0,18	0,16
Électricité	kWh	0,0035	0,0000	0,0078	0,0018
Résultat					
Compost	kg	1	1	1	1
CH ₄	kg	0,00275	0,00008	0,01010	0,00195
N ₂ O	kg	0,00009	0,00000	0,00028	0,00008

Table 8 Données d'entrée et fourchettes Teneurs en éléments nutritifs et substitution d'engrais (compost solide et vermicompost)

Compost				
	min	max	Source	moyenne
N (disponible sur) kg/tFM	1,2	4,2	[5]	2,7
P ₂ O ₅ kg/tFM	2,2	6,5	[5]	4,35
K ₂ O kg/tFM	3,5	8,9	[5]	6,2

Vermicompost

Table 9 Données d'entrée Vermicompost

Processus		Transport	Production d'activateurs	Compostage	Transport	Application par ha
mise	unité					
Liquide de rumen de zébu	l		5			
Eau	l		10			
Eau sucré	l	5	5			
Son de riz	kg	3	3			
Tout les matières organiques disponibles	kg			300		
Activator				23		
Distance	km	0,5			20	
Diesel	l/km	0,028				
Water	l					
Diesel	MJ			12,012		
électricité	kWh		2,28	0,135		
Compost	kg	300				
résultat						
Activateur	kg		23			
Compost	kg			161,50		
CH ₄	kg			0,2142		
N ₂ O	kg			0,0080		
N (disponible sur) kg/tFM						0,436
P ₂ O ₅ kg/tFM						0,703
K ₂ O kg/tFM						1,001

Resultats

Table 10 Résultats émissions spécifiques de GES pour les concepts considérés en kgCO₂eq./t compost

Processus	Compost liquide	Compost solide	Vermicompost
	kgCO ₂ eq./t compost	kgCO ₂ eq./t compost	kgCO ₂ eq./t compost
Transport biomass	0,09	0,02	0,62
Production d'activateurs			6,56
Compostage (CH ₄)	58,88	57,92	39,39
Compostage (N ₂ O)		21,72	13,12
Substitution K ₂ O	-0,64	-2,59	-2,59
Substitution N	-4,43	-12,34	-12,34
Substitution P ₂ O ₅	-0,27	-2,36	-2,36
Transport compost	0,09	0,02	0,62
C-Sequestration	-25,38	-25,38	-25,38

Publié par :

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sièges de la société

Bonn et Eschborn, Allemagne

Protection et réhabilitation des sols pour la sécurité alimentaire

Friedrich-Ebert-Allee 32+36

53113 Bonn

T +49 61 96 79-0

F +49 61 96 79-11 15

E soilprotection@giz.de

I <https://www.giz.de/en/worldwide/32181.htm>

Mise à jour

Juillet 2023

Crédits photos

Cover : GIZ/ECO Consult

Texte

Stefan Majer, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Katja Oehmichen, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Uta Schmieder, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Josephin Helka, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Christoph Siol, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Coordination

Patrick Smytzek, GIZ

Sur mandat du

Ministère fédéral allemand de la Coopération économique et
du Développement (BMZ)