



coopération  
allemande

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT



# Émissions de gaz à effet de serre des substrats de Terra Preta au Bénin

Fiche d'information pays Bénin

Implemented by

**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

## Résumé exécutif

Pour le concept analysé, la production et l'application du substrat Terra Preta (TPS) conduisent à des résultats d'émissions négatifs dans les hypothèses sélectionnées, résultant d'une séquestration de carbone supposée qui dépasse les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production du TPS.

Les émissions de méthane et d'oxyde d'azote provenant des processus de compostage et de pyrolyse sont de loin les sources d'émissions les plus importantes dans le résultat global. Le résultat montre une forte influence de la séquestration du carbone sur le bilan global. Le carbone introduit et séquestré de manière permanente, principalement via le biochar, conduit à des crédits de CO<sub>2</sub> élevés.

La production de TPS, y compris les processus de pyrolyse et de compostage, et l'application 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 écarts 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 au Bénin.

# Table de matières

RESUME EXECUTIF .....	2
TABLE DE MATIÈRES.....	3
LISTE DES ABREVIATIONS.....	4
1 INTRODUCTION.....	5
Description des voies pertinentes pour la fourniture de substrats de Terra Preta .....	6
2 METHODOLOGIE ET DEFINITIONS PRINCIPALES .....	7
Étape 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Étape 2 : Inventaire - hypothèses et données d'entrée .....	8
Étapes 3 et 4 : Evaluation de l'impact et interprétation - résultats du bilan.....	11
3 DISCUSSION .....	14
BIBLIOGRAPHIE .....	15
ANNEXE .....	17
Résultats .....	19

## 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

Le principal secteur économique du Bénin est l'agriculture, dont les deux tiers de la population tirent leurs revenus et qui représente 80 % des exportations. La croissance démographique et en même temps la croissance économique modérée de ces dernières années posent au Bénin des défis tels que l'établissement et la garantie de la sécurité alimentaire, l'augmentation de la productivité agricole et la modernisation, et le besoin de développement dans le secteur de la production (giz 2023b). L'agriculture est l'une des principales sources d'émissions de GES au Bénin et est simultanément vulnérable aux effets des émissions et au changement climatique (Moumouni und Idrissou 2013).

Le Bénin, comme d'autres pays du monde, est confronté à la perte de ses terres, ce qui rend l'exploitation agricole difficile. La fertilité des sols diminue, ce qui entraîne une baisse de la productivité. Les causes en sont, entre autres, la surexploitation des terres, le défrichement suivi du brûis, le tassement des sols et la pollution (giz 2023a). Le Bénin, pays d'Afrique de l'Ouest, tire la majeure partie de son énergie des biocarburants ou des déchets (124229 TJ) et du pétrole (97350 TJ). Le gaz naturel (5811 TJ), le charbon (2840 TJ) et l'énergie éolienne et solaire (27 TJ) y contribuent également dans une moindre mesure (situation en 2020) (International Renewable Energy Agency 2022)<sup>1</sup>.

L'utilisation de sources d'énergie renouvelables plutôt que fossiles permet de réduire l'impact environnemental et est considérée comme une source inépuisable. Le charbon végétal (biochar), en particulier, représente une opportunité pour le Bénin de remplacer les ressources traditionnellement utilisées, telles que le bois de feu, le charbon de bois et le gaz. L'utilisation de biochar offre un potentiel d'amélioration des fonctions du sol, par exemple pour le bilan en nutriments et en eau, a un effet positif sur les réactions du sol, lie les polluants et augmente la capacité de rendement. Pour les sols qui présentent des déficits dans ces domaines, par exemple en raison d'une exploitation agricole intensive, les biochars représentent, en plus de l'amélioration de la structure du sol, une possibilité de séquestration du carbone (Umweltbundesamt 2016). Pour produire le biochar au

Bénin, on utilise principalement les rafles du maïs, des feuilles de chiendent, des coques et brou de coco, de la poussière de charbon de bois, de la sciure, du bois, des coques de riz, des tiges du coton, des tiges du palmier, des coques de noix cajou et d'autres feuilles fines (Comlan Tossou et al. 2021). L'utilisation de ces biomasses se fait par carbonisation, suivie d'un broyage et d'un compactage de la poudre de charbon végétal mélangée à de l'eau, qui est liée à l'aide d'argile ou d'amidon (Comlan Tossou et al. 2021). Pour plus d'informations, l'étude 'Evaluation of the Energy Potentials of Agricultural Waste in West Africa from three Biomasses of Interest in Benin' d'Adamon et al. 2020 fait le bilan des potentiels des résidus et déchets agricoles au Bénin.

Table 1 Informations sur le pays

Superficie	112.622 km <sup>2</sup>	
Nombre d'habitants	13,0 Mio	50
Superficie agricole	24,8 %	20

L'utilisation de ressources biogènes régionales pour fournir des substrats destinés à améliorer les sols offre une grande opportunité de réduire la perte de la fertilité des sols au Bénin et de préserver le carbone organique du sol ainsi que sa fertilité. Des matériaux appropriés pour améliorer la qualité des sols peuvent être produits à l'aide d'une grande variété de matières premières et de processus de transformation.

Pour le Bénin, la production de biochar et de compost, ainsi que la combinaison de biochar moulu avec du compost pour obtenir de la Terra Preta ont été étudiées. Un bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant de la production de substrats de Terra Preta a été établi. L'objectif du bilan GES était de déterminer les facteurs principaux d'influence et moteurs et de préparer des recommandations d'action pour la mise en œuvre de technologies et de concepts correspondants au Bénin.

<sup>1</sup> D'autres chiffres sur le profil énergétique du Bénin sont disponibles dans une étude de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables International Renewable Energy Agency 2022.

## Description des voies pertinentes pour la fourniture de substrats de Terra Preta

Lors d'une phase de consolidation commune au début du projet, des concepts appropriés pour la production de substrats de Terra Preta Substrat (TPS) à partir de biochar et de compost ont été convenus avec les partenaires du projet au Bénin.

Pour ce faire, les résidus et déchets biogènes (le bilan GES a été calculé à titre d'exemple pour l'utilisation des rafles de maïs comme résidus de récolte) sont transformés en biochar par un procédé de pyrolyse. Le biochar ainsi produit est ensuite broyé et mélangé à des composts issus de déchets biogènes, de résidus et d'excréments d'animaux pour produire du TPS. L'ensemble de la chaîne de processus est représenté dans la .

La mise à disposition des résidus et déchets utilisés passe par une collecte et un transport en moto ou en tricycle sur une distance moyenne de 10 km jusqu'au lieu de traitement. La consommation de diesel pour cette étape de transport a été estimée à environ 0,028 l/km. Une fois que les rafles de maïs sont arrivés sur le lieu de transformation, ils sont placés dans une installation de pyrolyse qui transforme les rafles de maïs en biochar. Pour obtenir 1 kg de biochar, il faut environ 5 kg de rafles de maïs. Le processus de pyrolyse est stoppé en refroidissant le biochar avec de l'eau ou du sable afin d'éviter une carbonisation supplémentaire. Le besoin en eau pour cette étape est d'environ 0,75 litre par kilogramme de rafles de maïs.

Le biochar produit est broyé manuellement ou mécaniquement. Le broyage mécanique entraîne une consommation de diesel d'environ 71 MJ par tonne de biochar et (ou un besoin en électricité de 19,8 kWh par tonne de biochar).

Le matériau de base du compost avec lequel le biochar doit être mélangé est transporté en moyenne sur 20 km en moto ou en tricycle. La consommation par kilomètre qui en résulte correspond à la consommation déjà décrite pour la collecte des résidus biogènes pour la pyrolyse. Pour produire 1 kg de compost, il faut environ 2 kg de matières premières.

Le compost produit est mélangé manuellement avec le biochar, la proportion de mélange entre le biochar et le compost étant de 1 à 5. Le TPS ainsi produit peut ensuite être épandu sur des surfaces agricoles.

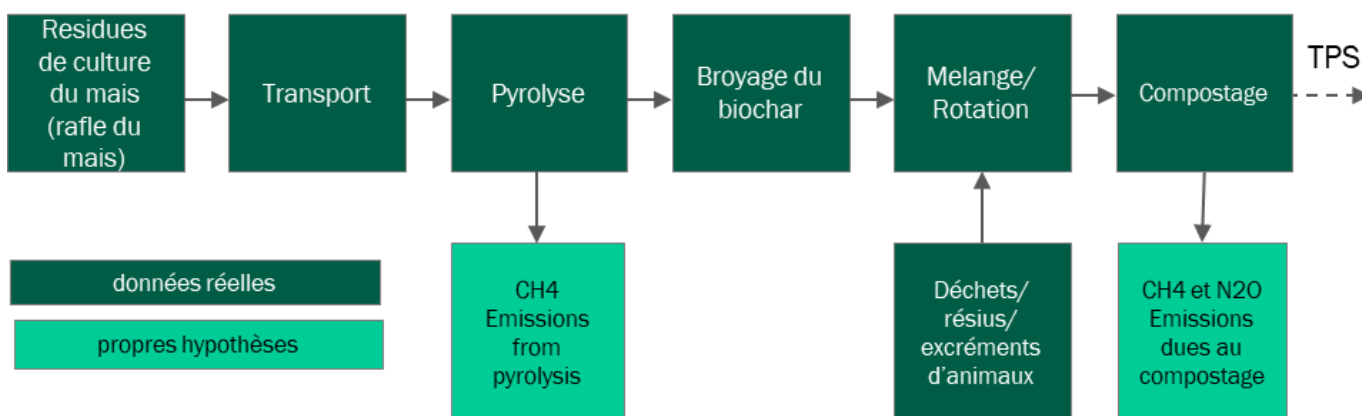


Figure 1 Chaîne de processus analysée pour la production de substrat de Terra Preta à partir de biochar et de compost au Bénin

## ② Méthodologie et définitions principales

Afin de faire le bilan des émissions liées à la production de substrats de Terra Preta, un bilan GES a été calculé sur la base méthodologique de l'analyse du cycle de vie. Les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044 s'appliquent à l'analyse du cycle de vie (ISO 14040; ISO 14044).

Selon les normes en vigueur, la procédure d'établissement du bilan se compose de quatre étapes partielles (voir *Figure 2*). Suivant de ces étapes partielles, des décisions et des définitions méthodologiques sont nécessaires. Les points essentiels sont décrits dans les paragraphes suivants.

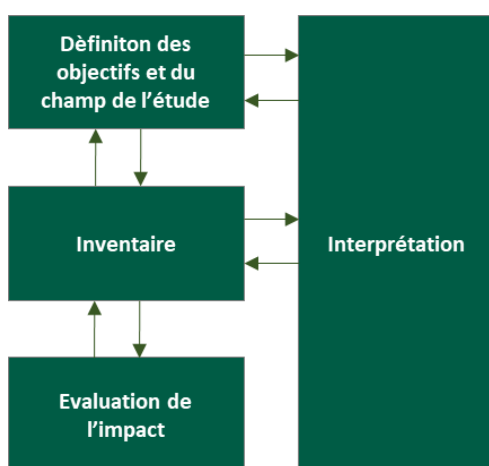


Figure 2 Composants de l'analyse du cycle de vie selon la norme ISO 14040 (ISO 14040)

### Étape 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude

#### Cadre d'évaluation

Les limites du système de comptabilisation des GES comprennent, outre les processus de fourniture et de traitement de la biomasse, de pyrolyse, de compostage et de production de Terra Preta présentés dans la , l'application de la Terra Preta dans l'agriculture. Cela prend essentiellement en compte le transport de la Terra Preta vers la surface d'application, le stockage du carbone via le biochar qu'elle contient et la mise à disposition de nutriments via le compost contenu dans la Terra Preta.

#### 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 Terra Preta en tant qu'amendement du sol. Une tonne de Terra Preta a été choisie comme unité de référence. Tous les intrants et les extrants ainsi que leurs effets sont rapportés à cette valeur de référence.

#### Crédits

Le calcul se focalise sur le produit principal défini, 1 tonne de Terra Preta, comme substrat pour améliorer la qualité du sol. La valeur ajoutée de la Terra Preta réside, d'une part, dans la séquestration du carbone par l'ajout de biochar et, d'autre part, dans la mise à disposition d'éléments nutritifs disponibles pour les plantes grâce à la part de compost dans la Terra Preta et à la potentielle de la substitution d'engrais synthétiques qui en résulte. Il existe différentes méthodes pour attribuer les impacts environnementaux associés au prorata du produit principal (ISO 14040; ISO 14044). Dans le cas présent, la méthode des crédits<sup>2</sup> 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. L'utilisation de la méthode des crédits permet de lire directement l'influence des avantages supplémentaires dans un diagramme à barres.

<sup>2</sup> 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.

## Évaluation de l'impact

L'évaluation présente de la production de Terra Preta tient compte uniquement de la catégorie d'impact du potentiel de réchauffement global (PRG). Au sein de la catégorie PRG, les gaz à effet de serre pertinents sont le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). Le potentiel de réchauffement global des gaz à effet de serre est exprimé en kg d'équivalents de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>eq). Pour convertir une masse donnée de méthane en kg de CO<sub>2</sub>eq, le poids du méthane est multiplié par 28 et la masse de protoxyde d'azote par 265 (sur la base d'une période de 100 ans selon le GIEC 2013) (Stocker et al. 2013).

## 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 de Terra Preta. Les données d'entrée et les facteurs d'émission sont présentés dans l'annexe.

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 au Bénin. Celui-ci a été complété par des données issues de la littérature ou de projets de recherche aux contenus de travail comparables.

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

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

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

Source de données	étape de processus						
	Transport	Pyrolyse	Broyage	Compostage	Mélanger Terra Preta	Transport	Application per ha
Fiche de collecte de données	X	X			X		
Base des données Ecoinvent				X			
Base des données DBFZ				X			X
Projet LabTogo	X						
Sector project			X				
Tisserant & Cherubini, 2019							X
IPCC, 2016							X
Dossou et al., 2019							X

Dans la catégorisation des sources de données, il convient de distinguer les informations relatives aux consommations de certains intrants (par exemple le diesel) ainsi qu'aux émissions directes (par exemple issues de la combustion du diesel) dans les processus de mise à disposition du TPS, et les émissions en amont issues de la mise à disposition de ces intrants. Alors que les informations relatives aux émissions en amont des intrants utilisés proviennent principalement de la base de données d'ACV Ecoinvent, les données relatives aux consommations et aux émissions directes dans les étapes de processus considérées proviennent du formulaire interne de collecte de données ainsi que des autres sources de données mentionnées dans le Annex.



## Transport

Les distances de transport des rafles de maïs vers le lieu de production ainsi que celles du transport des substrats de Terra Preta vers la surface agricole ont été fournies par la feuille de collecte de données. Le transport a été supposé effectué par un Tricycle. Les données correspondantes sur le carburant et la consommation de carburant sont basées sur les données du projet de recherche Lab Togo<sup>3</sup>.

## Pyrolyse et préparation du biochar

Les processus de pyrolyse pour la production de biochar peuvent entraîner des émissions de gaz (principalement du méthane et du monoxyde de carbone) et d'aérosols qui sont toxiques et contribuent également aux émissions de gaz à effet de serre, en particulier dans le cas de technologies et de processus sans traitement des gaz de pyrolyse. Par exemple, dans les fours traditionnels à terre ou à fosse couverte de terre, les gaz de pyrolyse sont rejetés dans l'atmosphère sans avoir été brûlés, ce qui génère d'importantes émissions de gaz. De même, dans les fours à tambour simples sans récupération des gaz, les gaz de pyrolyse non brûlés s'échappent en raison de la surpression. Dans ce cas, on s'attend à des émissions de méthane de l'ordre de 20 à 54 gCH<sub>4</sub>/kg de biochar (Al-Rumaihi et al. 2022; Cornelissen et al. 2016). Pour les technologies avancées, où les gaz pyrolytiques sont recirculés dans la chambre de combustion et brûlés en interne, on peut s'attendre à une réduction des émissions de CH<sub>4</sub> d'environ 75 % (entre 10 et 15 gCH<sub>4</sub>/kg de biochar) (Cornelissen et al. 2016; Sparrevik et al. 2015). Une valeur de 12 kgCH<sub>4</sub>/kg de biochar a été retenue pour le concept analysé. Les gaz à effet de serre indirects issus du processus de pyrolyse, tels que les NO<sub>x</sub>, n'ont pas été pris en compte dans ce calcul.

Le conditionnement du biochar sous forme de processus de broyage est effectuée à l'aide de machines. Les données de consommation pour le broyeur à marteaux fonctionnant au diesel ont été tirées du projet Sector<sup>4</sup>. Le facteur d'émission diesel provient de Swiss centre for life cycle inventories 2022.

## Mélanger le biochar et la matière à composter pour obtenir la Terra Preta

Le biochar et la matière à composter sont mélangés. Comme ce processus est réalisé manuellement, il n'y a pas de dépenses significatives en termes d'émissions.

## Compostage

Les besoins en énergie/électricité (*Table 6* de l'annexe) pour le fonctionnement de l'installation de compostage (retourner, etc.) ainsi que le facteur d'émission pour la production d'électricité spécifique au Bénin ont été tirés de la base de données Ecoinvent (*Table 7* de l'annexe).

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. Cependant, au cours du compostage, des gaz à effet de serre à fort PRP tels que le N<sub>2</sub>O et le CH<sub>4</sub> peuvent être émis en raison de la dégradation organique, en particulier de la dégradation rapide de la matière organique azotée et de la présence de zones anaérobies. La gamme des émissions prises en compte dans cette étude est tirée de la base de données DBFZ ainsi que du Swiss centre for life cycle inventories 2022 et du Swiss centre for life cycle inventories 2010. Pour le présent calcul, une valeur moyenne a été utilisée. Les données sont énumérées dans le *Table 6* de l'annexe et sont évaluées et discutées dans le chapitre sur les résultats.

L'ajout de biochar au compost peut réduire les émissions de CH<sub>4</sub> en raison (i) d'une meilleure aération, (ii) d'une réduction de la densité apparente et de la diffusion des gaz (iii) de la création de conditions propices aux consommateurs de CH<sub>4</sub>. Cependant, l'efficacité de l'élimination du CH<sub>4</sub> varie de 10 % à plus de 90 % (Yin et al. 2021; Nguyen et al. 2022). En outre, l'ajout de biochar réduit la quantité d'azote inorganique qui peut être utilisée par les bactéries nitrifiantes et dénitrifiantes en capturant l'ammoniac et le nitrate, diminuant ainsi les émissions de N<sub>2</sub>O. Des réductions d'émissions allant de 12 % à plus de 90 % peuvent être obtenues par l'ajout de biochar.

En raison des incertitudes importantes concernant les émissions provenant du compostage et la réduction des émissions de GES résultant de l'ajout de biochar, cette

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

<sup>4</sup> <https://sector-project.eu/>

réduction n'a pas été incluse dans le calcul. Au lieu de cela, sans connaissance exacte des processus et des circonstances, des valeurs de la fourchette inférieure ont été utilisées pour le calcul des émissions de carbone.

### Calcul des crédits pour la séquestration supposée du carbone par l'épandage du biochar comme substrat dans la Terra Preta

Pour le biochar contenu dans la Terra Preta, on suppose qu'une partie du carbone se présente sous une forme stable à la dégradation. En cas d'utilisation agricole de la Terra Preta comme amendement, cette partie de carbone reste dans le sol pendant une période prolongée. Cela signifie que le carbone fixé pendant la croissance de la plante est stocké et donc retiré de l'atmosphère et peut être pris en compte au moyen d'un crédit CO<sub>2</sub>. Dans ce contexte, la partie de carbone dans le biochar dépend entre autres de la biomasse utilisée dans la pyrolyse et la part de carbone qui se présente à son tour sous une forme stable dépend des températures de pyrolyse sous-jacentes. En se basant sur les données de Dossou et al. 2019, de Tisserant und Cherubini 2019 et de IPCC 2019, on obtient pour le stockage du CARBONE une marge de variation de 26 à 56% par rapport à la masse du biochar. Pour le calcul des crédits de GES, la quantité de carbone stable est multipliée par le facteur de conversion du CO<sub>2</sub> de 3,67gCO<sub>2</sub>/g C.

Une valeur moyenne a été utilisée pour le calcul présent. La marge de variation des données d'entrée et les facteurs d'émission qui en résultent sont montrées dans la *Table 4* de l'annexe et sont évalués et discutés dans le chapitre des résultats.

### Reproduction d'humus et possible séquestration de C par l'utilisation de composts

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<sub>2</sub>. Pour calculer les crédits de GES, la quantité de carbone décomposable est multipliée par le facteur de conversion du CO<sub>2</sub> de 3,67 gCO<sub>2</sub>/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.

### Calcul des crédits pour la substitution d'engrais industriels par les nutriments contenus dans le compost

Les éléments nutritifs disponibles pour les plantes contenus dans le compost, à savoir K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et N, peuvent réduire le besoin d'engrais synthétiques. Les crédits de GES qui en découlent 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 European Commission 2018 et sont listés dans le tableau 5 de l'annexe.

## 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 sont présentés dans les trois graphiques de la et sont expliqués ci-dessous :

- graphique (A) : Emissions dues aux processus de transport, à la pyrolyse, au broyage du biochar et au compostage ;
- graphique (B) : Crédits liés à la séquestration du carbone et à la substitution des engrais synthétiques ;
- graphique (C) : total et émissions totales.

Les émissions de méthane et de protoxyde d'azote provenant du compostage (représentées par les segments de colonne colorés en rose) et les émissions de méthane issues de la pyrolyse (marquées en jaune) ont le plus grand impact sur les émissions de GES provenant de la production de Terra Preta (voir Figure 3, graphique (A)). Les émissions dues à l'utilisation de combustibles fossiles (diesel) pour les processus de transport et d'exploitation sont plutôt faibles 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 , graphique (B). Le crédit pour l'apport de nutriments et la substitution des engrais synthétiques qui en découle s'élève au total à -14 gCO<sub>2</sub>e/t Terra Preta pour les 3 types d'engrais. Cependant, le crédit pour le stockage du carbone représente de loin la plus grande partie du crédit total, avec 272 gCO<sub>2</sub>e/t de Terra Preta.

Les émissions totales de GES sont calculées comme la somme des émissions (graphique A) et des crédits octroyés (graphique B). Le résultat est présenté dans la colonne des totaux de la graphique (C) et montre l'influence significative des crédits, en particulier des crédits pour la séquestration du carbone par l'utilisation de biochar et les émissions de GES ainsi évitées, sur les émissions totales. La valeur des émissions totales est de -109 CO<sub>2</sub>eq/t Terra Preta, compte tenu des hypothèses retenues. Les principaux facteurs d'influence et les incertitudes liées au calcul concernant les crédits mais aussi les émissions dues au compostage sont décrits et discutés plus en détail dans la section suivante.

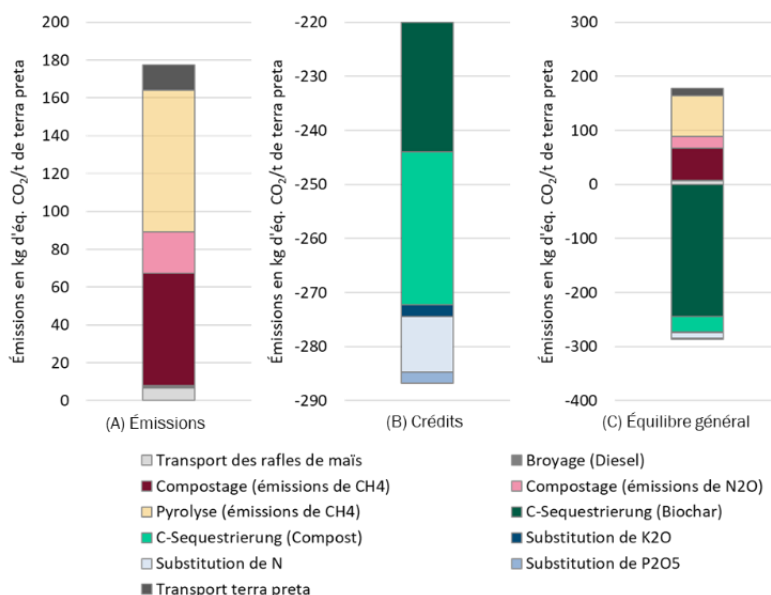


Figure 3 Résultats du calcul des émissions de GES pour A) les émissions dues aux processus de transport, à la pyrolyse, à la préparation du biochar et au compostage ; B) les crédits de GES pour la séquestration du carbone et la substitution des engrais synthétiques ; C) la somme et le total des émissions

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

Le biochar peut contribuer d'une part à l'amélioration des fonctions du sol (par ex. bilan des nutriments et de l'eau, réaction du sol, fixation des polluants, capacité de rendement), surtout dans les sols qui présentent des déficits correspondants. D'autre part, le biochar à base de pyrolyse, en particulier, peut également favoriser la séquestration de carbone dans les sols en raison de sa grande stabilité. Il existe plusieurs facteurs qui influencent la performance écologique ou la stabilité à long terme de l'utilisation du biochar dans les sols agricoles. Parmi ceux-ci, on compte entre autres :

1. les conditions pédologiques et climatiques
2. le type de gestion du sol
3. les conditions de production lors de la transformation de la biomasse en biochar (gazéification, pyrolyse).

- La teneur en carbone organique du biochar pour chaque mode de production et chaque matériau de départ.
- Part du carbone du biochar restant après 100 ans, en fonction de la température (marge de variation 65-89%) (IPCC 2019).

En particulier à partir des deux derniers facteurs mentionnés, la teneur en carbone (dépendant du type de transformation et du type de biomasse) et la part du carbone stable (dépendant de la température), on obtient une large marge de variation pour le calcul du crédit pour la séquestration du carbone en fonction des hypothèses retenues. Comme le montre la *Figure 4*, même avec le confinement supposé en supposant que le biochar de pyrolyse est basé sur des biomasses de type herbacé ( $0,65 \pm 45\%$  du carbone) (Dossou et al. 2019), la valeur des crédits GES peut varier fortement. Une connaissance précise de la température de pyrolyse pourrait limiter quelque peu la marge de variation. Pour une plus grande fiabilité des résultats de calcul, une analyse des paramètres correspondants du biochar est nécessaire.

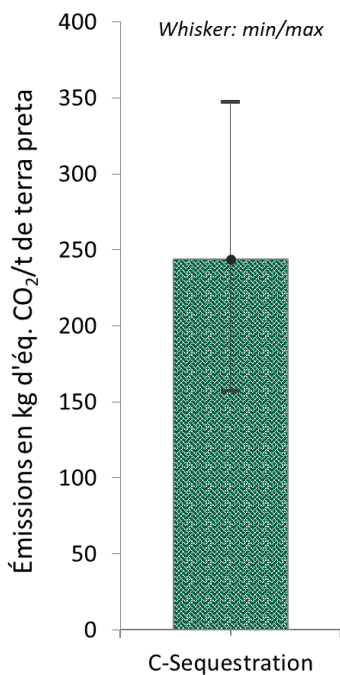


Figure 4 Marge de variation possible du crédit GES sur la base des hypothèses et incertitudes retenues

### Marge de variation des émissions directes de GES dues au compostage

La conception du procédé 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 en décomposition 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. Si l'offre en oxygène est suffisante, par exemple en retournant fréquemment le tas de compost, la formation de dioxyde de carbone domine. 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 de la Terra Preta, comme le montre la *Figure 2*. L'incertitude liée à l'hypothèse des émissions est illustrée par la marge de variation présentée dans la *Figure 5* à partir de données de mesures d'émissions. Dans des conditions de décomposition défavorables, les émissions peuvent être multipliées comme indiqué. 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.

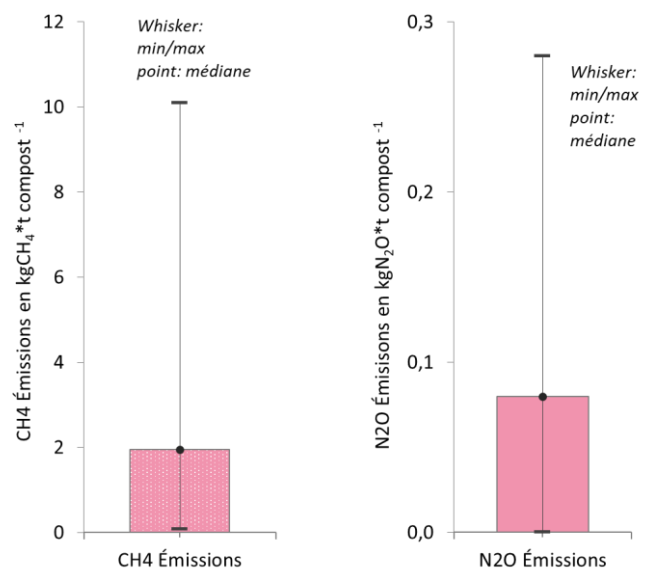


Figure 5 Marge de variation d'émissions dues au compostage résultant des incertitudes des données d'entrée. Figure de gauche : marge de variation des émissions de CH<sub>4</sub>, Figure de droite : marge de variation des émissions de N<sub>2</sub>O

### Marge de variation des teneurs en éléments nutritifs dans la Terra Preta grâce à l'ajout de compost

Comme décrit précédemment, les éléments nutritifs contenus dans le compost peuvent remplacer les engrais synthétiques dans le cadre d'une utilisation agricole de la Terra Preta. Comme il n'y avait pas de données spécifiques à ce sujet, nous nous sommes à nouveau basés sur des valeurs de la littérature. Les marges des variations pour les quantités d'éléments nutritifs N, K<sub>2</sub>O et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, qui dépendent en premier lieu de la biomasse à composter, sont représentées dans la **Error! Reference source not found.** et montrent l'incertitude liée à l'application de ces valeurs, incertitude qui pourrait à nouveau être résolue par une analyse adéquate du compost.

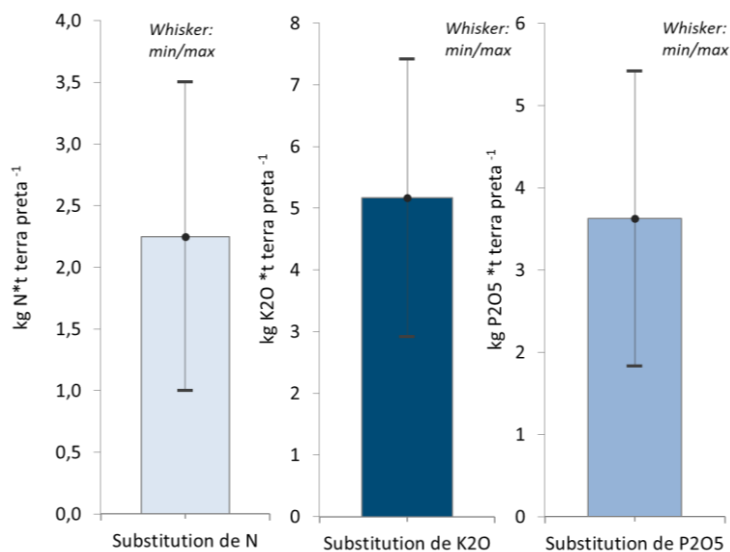


Figure 4 Marge de variation possibles des teneurs en éléments nutritifs pour les substrats de Terra Preta faisant l'objet d'un bilan

### ③ Discussion

Les résultats du bilan GES réalisé montrent que le concept analysé pour la production de substrat de terra preta génère globalement peu d'émissions de GES par tonne de TPS.

Les émissions de méthane et de protoxyde d'azote provenant du compostage et les émissions de méthane issues de la pyrolyse 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 dans le cadre du fonctionnement du processus, sont plutôt secondaires par rapport aux émissions directes dues au compostage.

Outre les domaines d'émissions identifiés le long de la chaîne de processus, le résultat montre une forte influence de la séquestration du carbone dans le bilan global. Le carbone introduit et fixé durablement, surtout par le biais du biochar, conduit à un crédit élevé pour la quantité de CO<sub>2</sub> qui a été fixée lors de la croissance de la biomasse utilisée et introduite dans le sol par le biochar.

La production de biochar et son application aux sols agricoles interagissent avec l'environnement et le système climatique de multiples façons complexes, ce qui entraîne de nombreuses incertitudes concernant les émissions de gaz à effet de serre :

- les émissions de GES dues à la pyrolyse
- la séquestration du carbone
- la réduction des émissions dues au processus de compostage par l'ajout de biochar avant le compostage.

Il en va de même pour le processus de compostage, qui est un processus de décomposition très complexe, dépendant de divers paramètres et entraînant une large gamme d'émissions. Il s'ensuit que les principaux facteurs influençant le résultat global, le crédit pour la séquestration du carbone et les émissions provenant du compostage et de la pyrolyse, sont associés à des incertitudes élevées. La littérature montre des marges des variations de résultats élevées pour ces deux paramètres. Afin de réduire ces marges de variations à l'avenir et

d'augmenter encore la robustesse des résultats du bilan, des mesures des valeurs d'émissions 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 au Bénin. Ces valeurs peuvent être intégrées dans le bilan et augmenter ainsi la pertinence des résultats.

Le concept étudié pour la production de Terra Preta se caractérise 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 augmentation de la production de substrats de Terra Preta.

D'autre part, un degré de mécanisation plus élevé peut également augmenter la consommation relative de sources d'énergie telles que l'électricité et le diesel par tonne de substrat de Terra Preta produite, et donc entraîner une augmentation relative des émissions de GES. Ces interactions devraient être étudiées plus en détail à une date ultérieure, le cas échéant.

Grâce à un rapport optimal entre les proportions de biochar et de compost, les substrats de Terra Preta produits mettent à disposition, outre la formation de carbone dans le sol, des éléments nutritifs permettant d'augmenter la fertilité du sol. Ils sont donc appropriés pour soutenir les processus de production agricole et l'utilité des sols, même à long terme. L'efficacité de l'utilisation des nutriments contenus dans le compost et de la séquestration du carbone peut être optimisée par la gestion des systèmes de culture.

Si l'objectif de l'utilisation du biochar et du compost change à l'avenir, par exemple pour fixer une plus grande part de carbone dans le sol, il peut être utile d'adapter les proportions de biochar et de compost pour la production de substrats de Terra Preta.

# Bibliographie

- Adamon, F. D.; Jossou A. A.; Adomou, A. N.; Pinta, F. (2020): Evaluation of the energy potential of agricultural waste in west africa from three biomasses of interest in benin. In: *International Journal of Advanced Research* 8 (4), S. 766–774. Online verfügbar unter [http://www.journalijar.com/uploads/105\\_IJAR-31285.pdf](http://www.journalijar.com/uploads/105_IJAR-31285.pdf), zuletzt geprüft am 31.01.2023.
- Al-Rumaihi, Aisha; Shahbaz, Muhammad; Mckay, Gordon; Mackey, Hamish; Al-Ansari, Tareq (2022): A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167, S. 112715. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112715.
- Comlan Tossou, R.; Godjo, T.; Nicodéme Atchadé, M. (2021): Analysis of the determinants of the adoption of biochar in Benin. *Chaines de Valeurs et Transformations Intégrales des Ressources Locales*. Hg. v. *Conférence Internationale LOREXP-2021*. Online verfügbar unter [https://loexp.org/wp-content/uploads/2021/12/7\\_Com\\_LOREXP\\_2021\\_A1140\\_COMLAN.pdf](https://loexp.org/wp-content/uploads/2021/12/7_Com_LOREXP_2021_A1140_COMLAN.pdf), zuletzt geprüft am 31.01.2023.
- Cornelissen, Gerard; Pandit, Naba Raj; Taylor, Paul; Pandit, Bishnu Hari; Sparrevik, Magnus; Schmidt, Hans Peter (2016): Emissions and Char Quality of Flame-Curtain "Kon Tiki" Kilns for Farmer-Scale Charcoal/Biochar Production. In: *PloS one* 11 (5), e0154617. DOI: 10.1371/journal.pone.0154617.
- 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.
- Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: *Nachhaltiges Landmanagement international verankern. Projekturzbeschreibung*. Online verfügbar unter <https://www.giz.de/de/weltweit/80341.html>, zuletzt geprüft am 31.01.2023.
- Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: *Promoting agriculture in Benin (ProAgri)*. Project description. Online verfügbar unter <https://www.giz.de/en/worldwide/80045.html>, zuletzt geprüft am 31.01.2023.
- Dossou, Jonas A.; Diogo, Rodrigue V. Cao; Igue, Mouinou A. (2019): *FER-TILISATION COTONNIERE ET MAIZICOLE A BASE DE TERRA PRETA : PERFORMANCES AGRONOMIQUES. RAPPORT D'ACTIVITES 2018 (Projet Protection et Réhabilitation des Sols pour améliorer la Sécurité)*.
- 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*.
- International Renewable Energy Agency (2022): *Energy Profile. Benin*. IRENA. Online verfügbar unter [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Statistics/Statistical\\_Profiles/Africa/benin\\_Africa\\_RE\\_SP.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Statistics/Statistical_Profiles/Africa/benin_Africa_RE_SP.pdf), zuletzt geprüft am 31.01.2023.
- IPCC (2019): *Appendix 4 Method for Estimating the Change in Mineral Soil Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hg. v. IPCC.
- Moumouni, I. M.; Idrissou, L. A. (2013): *Innovation Systems for Agriculture and Climate in Benin. An Inventory. Climate Learning for African Agriculture: Working Paper No.3*. Online verfügbar unter [https://www.nri.org/images/documents/development-programmes/climate\\_change/publications/WorkingPaper3Benin.pdf](https://www.nri.org/images/documents/development-programmes/climate_change/publications/WorkingPaper3Benin.pdf), zuletzt geprüft am 31.01.2023.
- Nguyen, Minh Ky; Lin, Chitsan; Hoang, Hong Giang; Sanderson, Peter; Dang, Bao Trong; Bui, Xuan Thanh et al. (2022): Evaluate the role of biochar during the organic waste composting process: A critical review. In: *Chemosphere* 299, S. 134488. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134488.
- 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.
- 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.

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.

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.

Tisserant, Alexandre; Cherubini, Francesco (2019): *Potentials, Limitations, Co-Benefits, and Trade-Offs of Biochar Applications to*

*Soils for Climate Change Mitigation.* In: *Land* 8 (12), S. 179. DOI: 10.3390/land8120179.

Umweltbundesamt (2016): *Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer "veränderter" Biomasse als Bodenhilfsstoffe für die C-Sequestrierung in Böden.* Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_04\\_2016\\_chancen\\_und\\_risiken\\_des\\_einsatzes\\_von\\_biokohle.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_04_2016_chancen_und_risiken_des_einsatzes_von_biokohle.pdf).

Yin, Yanan; Yang, Chao; Li, Mengtong; Zheng, Yucong; Ge, Chengjun; Gu, Jie et al. (2021): *Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: A review.* In: *The Science of the total environment* 798, S. 149294. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149294.





Table 4 Données d'entrée et largeurs de bande C-séquestration

Biochar	min	max	Source	Valeur moyenne
Teneur en C %	43%	71%	[3]	57%
C résilient	60%	80%	[4]	70%
Conversion C en CO <sub>2</sub>	3,67			
CO <sub>2</sub> sequestration per kg biochar	0,95	2,08		1,46
CO <sub>2</sub> sequestration per t terra preta	157,80	347,41		244,05

Table 5 Données d'entrée et fourchettes Teneurs en nutriments et substitution d'engrais

Terra Preta	min	max	Source	Average
N (disponible) kg/tFM	1,2	4,2	[5]	2,7
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg/tFM	2,2	6,5	[5]	4,35
K <sub>2</sub> O kg/tFM	3,5	8,9	[5]	6,2
N- disponible in kg per t terra preta	1,00	3,50		2,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> in kg per t terra preta	1,83	5,42		3,62
K <sub>2</sub> O in kg per t terra preta	2,92	7,42		5,17

Table 6 Données d'entrée et fourchettes Émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O dues au compostage

Terra Preta		Valeur moyenne	min	max	Valeur médiane
Input	Unité				
Biomass (rapport 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 <sub>4</sub>	kg	0,00464	0,00008	0,01010	0,00232
N <sub>2</sub> O	kg	0,00018	0,00000	0,00065	0,00011

Table 7 Facteurs d'émission

	Unit	Valeur	Source
Diesel	kgCO <sub>2</sub> -eq./l	3,14	RED II
Électricité Benin	gCO <sub>2</sub> -eq./kWh	600	Ecoinvent 3.9
Engrais N*	kgCO <sub>2</sub> -eq./kg	4,57	RED II
Engrais K <sub>2</sub> O*	kgCO <sub>2</sub> -eq./kg	0,417	RED II
Engrais P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	kgCO <sub>2</sub> -eq./kg	0,542	RED II

\*Les émissions de transport entre le lieu de production et de lieu d'application font partie des valeurs.

## Résultats

Table 8 Résultats émissions spécifiques de GES pour le concept considérés en kgCO<sub>2</sub>eq./t TPS

Processus	Terra preta substrate (TPS)
	kgCO <sub>2</sub> eq./t TPS
Transport des rafles de maïs	6,77
Broyage (Diesel)	1,26
Compostage (émissions de CH <sub>4</sub> )	59,4
Compostage (émissions de N <sub>2</sub> O)	21,73
Pyrolyse (émissions de CH <sub>4</sub> )	74,93
C-Sequestrierung (Biochar)	-244
C-Sequestrierung (Compost)	-28,31

**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](mailto:soilprotection@giz.de)

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

**Mise à jour**

Julliet 2023

**Crédits photos**

Cover : Carola Jacobs/ GIZ

**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)