

Composts de déchets urbains et dynamiques du carbone du sol à Donsin, Burkina Faso

DASMANÉ BAMBARA^{1*}, ADJIMA THIOMBIANO², VICTOR HIEN¹

¹*Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Burkina Faso.*

²*Université de Ouagadougou, Burkina Faso.*

Présenté le 18 juillet 2014, accepté le 15 juin 2015. Section: Research Paper

Résumé : Au Burkina Faso, les travaux sur le rôle des composts dans la lutte contre l'effet de serre sont rares. Cette étude visait à évaluer les impacts d'apports de six types de composts de déchets urbains sur les stocks de carbone du sol dans un essai de sorgho conduit pendant trois ans. Les composts ont été apportés à raison de 3 t MS ha⁻¹ an⁻¹, seuls ou couplés à 50 kg ha⁻¹ an⁻¹ d'urée. Les propriétés physico-chimiques du sol ont été analysées sur des échantillons de sols prélevés dans les 20 premiers cm à l'issue des trois années de test. Les traitements ont été comparés à un témoin absolu sans fertilisation et à un traitement de 50 kg ha⁻¹ an⁻¹ d'urée, ensuite une comparaison a été faite entre les traitements de composts seuls et ceux complétés avec l'urée. Les composts, seuls ou combinés à l'urée ont amélioré la densité apparente, la terre fine, la teneur en carbone organique du sol. Les stocks de carbone des traitements sous composts seuls qui variaient de 8,76 à 11,58 t ha⁻¹ n'ont pas connu une augmentation significative par rapport au témoin. Quand les composts étaient couplés à l'urée, les stocks variaient de 8,42 à 13,07 t ha⁻¹, les augmentations étaient significatives. Les meilleurs composts ont été ceux produits à partir de mélanges diversifiés et équilibrés de substrats biodégradables. La valorisation des composts de déchets urbains respectant les normes environnementales peut améliorer la fertilité des sols et lutter également contre l'effet de serre.

Mots clés : composts de déchets urbains, fertilité du sol, effet de serre, Burkina Faso.

Abstract: In Burkina Faso, information about composts' role in greenhouse gas reducing is scarce. This study assessed six urban composts application effects on soil carbon storage in sorghum three-year experiment. Composts were applied at 3 t DM ha⁻¹ year⁻¹ rate, single or combined with 50 t ha⁻¹ year⁻¹ urea rate. Soil properties were analyzed with soil sampled in the early 20 cm of soil. The treatments were compared to a control without any fertilization and a 50 t ha⁻¹ year⁻¹ urea treatment. Comparisons were also done between single composts treatments and composts combined with 50 t ha⁻¹ urea ones. In comparison to the control, single or combined with urea composts application

improved soil bulk density, fine soil rate and organic carbon contents. Single composts treatments carbon storage ranging from 8.76 to 11.58 t ha⁻¹ were not significantly different from the control. However, when composts were combined with urea, carbon storage ranged from 8.42 to 13.07 t ha⁻¹ and was significantly increased by comparison to the control. Best composts seemed to be those produced with various and balanced composting materials. Eco-friendly urban waste composts adoption could improve soil fertility and mitigate greenhouse gas emission.

Keywords: urban wastes composts, soil fertility, greenhouse effect, Burkina Faso

Introduction

Au Burkina Faso 5 à 40% des terres du Plateau Central sont soumises à une dégradation sévère (Kagambèga *et al.*, 2011). Cette dégradation se traduit par une perte de la productivité des sols et de la biodiversité mettant en péril les moyens de subsistance des populations (Fonds pour l'Environnement Mondial-Fonds International de Développement Agricole (FEM-FIDA), 2002). Pour faire face à cette dégradation des terres, les producteurs utilisent la fumure organique comme un moyen de restauration de la fonction productive du sol (Zougmore *et al.*, 2004).

La matière organique des sols a deux fonctions majeures : (i) sur un plan local, elle est un facteur essentiel de la fertilité des sols cultivés ; (ii) sur un plan global, les sols représentent une réserve majeure de carbone terrestre, avec une masse mondiale estimée à 2 000 et 2 500 Gt dont 27 à 36% dans les zones sèches (Bernoux et Chevallier, 2013). L'estimation des stocks de carbone organique du sol est donc une nécessité pour évaluer l'impact des modes de gestion des terres sur l'émission des gaz à effet de serre. Au Burkina Faso, l'effet positif de l'apport de fumure organique telle que le compost sur la fonction productive du sol a été mis en évidence dans de nombreux travaux (Ouédraogo *et al.*, 2001 ; Zougmore *et al.*, 2004). Toutefois, les informations sur les services écosystémiques du sol tel que le stockage de carbone en relation avec le type de compost utilisé sont rares. En plus, les composts utilisés sont à base de résidus culturaux (paille de céréale, litières d'animaux domestiques notamment). Les connaissances sur les composts provenant de mélanges rationnels de déchets solides urbains biodégradables sont insuffisantes. Pourtant, les quantités de ces déchets deviennent de plus en plus importantes avec le phénomène d'urbanisation croissante (United Nations, 2008). La ville de Ouagadougou en a produit 300 000 t en 2007 et en 2025, 1000 000 t de déchets sont attendus (Kaboré *et al.*, 2011). Dans cette dynamique, les composts de déchets urbains peuvent représenter un enjeu important en tant que source de matière organique dans le stockage du carbone dans le sol.

C'est pour combler cette lacune que cette recherche a été menée dans le village de Donsin à 25 km au nord-est de Ouagadougou, zone semi-rurale où les composts de déchets urbains peuvent être valorisés. L'étude vise à évaluer, à partir

d'expérimentation en milieu réel, l'impact de six formules de composts de déchets urbains de Ouagadougou sur le potentiel de stockage du carbone dans le sol et à identifier la formule de compost qui contribue le plus à la réalisation de ce service écosystémique essentiel du sol.

Matériel et méthodes

Milieu d'étude

L'étude a été conduite à Donsin, localisé à 12° 35' 01" de latitude Nord et 01° 24' 06" de longitude Ouest. Avec une superficie de 9,38 km², il est situé à 25 km au nord-est de Ouagadougou, chef-lieu de la région du Centre. Donsin est inclus dans l'espace géographique du Grand-Ouaga. La population compte environ 1 889 habitants avec une densité de 201 habitants/km² (Institut National de la Statique et de la Démographie (INSD), 2008). Les activités socio économiques comprennent l'agriculture pluviale (sorgho dominant), le maraîchage, l'élevage, la pêche, le petit commerce et l'artisanat. Donsin appartient au secteur phytogéographique nord-soudanien (Fontès et Guinko, 1995) dans la zone climatique sahélo-soudanienne avec une pluviométrie annuelle variant entre 700 et 900 mm (Figure 1). Les différents types de sols rencontrés appartiennent à la classe des sols ferrugineux tropicaux (Bureau National des Sols (BUNASOLS), 1998). La végétation est constituée de savanes arbustives à arborées. Le contexte écologique de Donsin est marqué par des sols et un couvert végétal dégradés. La dégradation des sols se caractérise par leur faible niveau de fertilité lié notamment à leurs faibles teneurs en matière organique (Zougmoré *et al.*, 2004).

Choix et caractérisation du site expérimental

L'essai a été réalisé en milieu réel. Les parcelles sont aménagées en cordons pierreux. L'étude pédologique réalisée à partir de trois profils indique que le sol est un lixisol endopetroplinthique (World Reference Base for soil resources (WRB), 2006), équivalant dans la classification française, à un sol ferrugineux tropical lessivé induré moyennement profond (Convention de Pédologie et de Classification des Sols (CPCS), 1967). Les caractéristiques pédologiques de l'horizon superficiel 0-20 cm sont reportées dans le tableau 1.

Les sables totaux constituent la principale classe granulométrique et la texture est limoneuse (Richer de Forges, 2010). Se référant aux normes rapportées par BUNASOLS (1990), l'horizon de surface du sol possède des teneurs, basse en matière organique, en azote et en phosphore totaux, moyenne en potassium total, très basse en phosphore assimilable. Cet horizon est moyennement acide (Tableau 1).

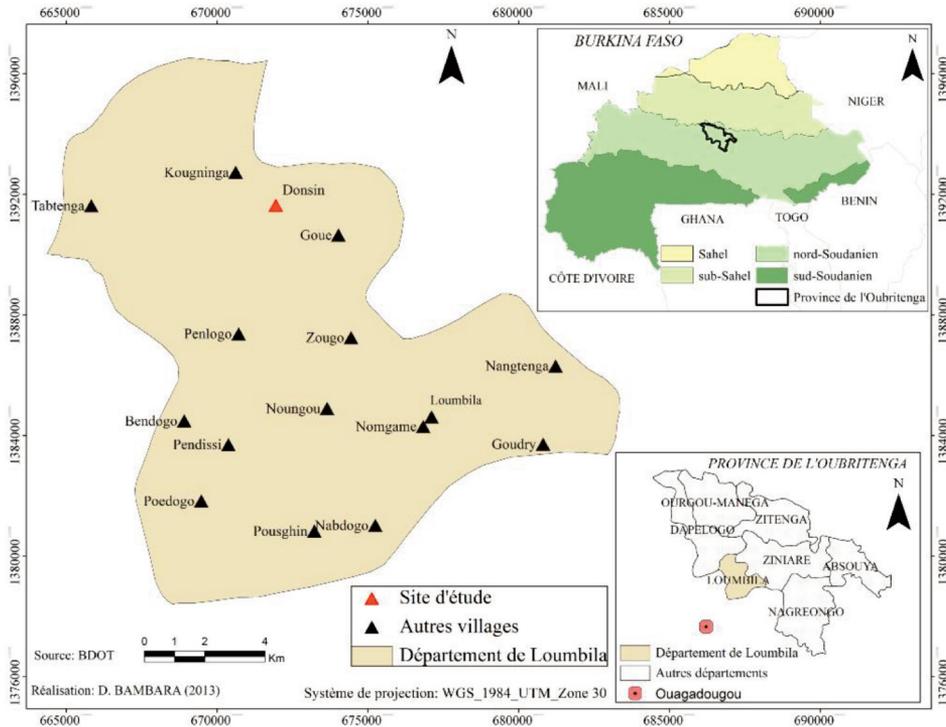


Figure 1 - Situation géographique du village de Donsin.

PARAMETRES	MOYENNES ± ECART TYPE
Granulométrie (%)	
Argile	15,77 ± 2,50
Limons totaux	36,40 ± 5,24
Sables totaux	47,83 ± 6,42
Texture	(Limoneuse)
Type de sol (WRB, 2006)	(Lixisol endopédroplinthique)
Matière organique (%)	0,744 ± 0,150
Carbone total (%)	0,432 ± 0,087
Azote total (%)	0,033 ± 0,004
C/N	13,31 ± 3,49
Phosphore total (ppm)	137,62 ± 12,82
Phosphore assimilable (ppm)	3,62 ± 1,16
Potassium total (ppm)	1725,45 ± 387,62
pH eau	5,8 ± 0,3

Tableau 1 - Caractéristiques pédologiques de l'horizon de surface (0-20 cm) du sol du site expérimental (Moyennes ± Ecart type, n = 3 profils).

Argiles (Ø < 2 m) ; limons totaux (Ø compris entre 2 - 50 m) ; sables totaux (Ø compris entre 50 - 2 000 m)

Tableau 2 - Propriétés chimiques des composts (moyennes \pm écart type, $n = 3$ prélèvements).

PARAMETRES	COMPOST 1	COMPOST 2	COMPOST 3	COMPOST 4	COMPOST 5	COMPOST 6
MS (%)	60,93b \pm 4,29	68,50a \pm 8,52	67,00ab \pm 9,30	69,39a \pm 3,69	72,05a \pm 6,84	45,87c \pm 6,90
Ct (g kg ⁻¹)	363,85cd \pm 9,60	391,1b \pm 20,1	366,75c \pm 7,30	335,10e \pm 10,10	343,90de \pm 12,90	415,10a \pm 7,10
Nt (g kg ⁻¹)	21,80ab \pm 9,70	25,80a \pm 0,60	26a \pm 3,80	21,50ab \pm 5,80	21,10ab \pm 1,00	16,10b \pm 3,30
C/N	16,69ab \pm 8,63	15,17b \pm 1,08	14,28b \pm 1,75	15,50b \pm 5,10	16,34b \pm 1,41	25,78a \pm 6,24
Pt (g kg ⁻¹)	1,85a \pm 0,37	1,73a \pm 0,11	1,83a \pm 0,06	1,98a \pm 0,33	1,81a \pm 0,18	0,89b \pm 0,17
Kt (g kg ⁻¹)	5,86c \pm 0,54	7,16c \pm 0,29	13,68a \pm 2,41	7,16c \pm 0,72	10,09b \pm 1,07	7,82c \pm 0,90
Ca (g kg ⁻¹)	19,22d \pm 0,86	22,53c \pm 3,07	28,12b \pm 2,26	35,39a \pm 0,64	33,53a \pm 0,51	27,92b \pm 1,27
Mg (g kg ⁻¹)	2,12c \pm 0,10	2,62b \pm 0,46	2,95ab \pm 0,15	2,66b \pm 0,24	3,13a \pm 0,18	3,01ab \pm 0,26
pH eau	8,6ab \pm 0,4	8,8a \pm 0,2	8,1b \pm 0,2	8,4ab \pm 0,3	8,5ab \pm 0,4	8,3ab \pm 0,3

La matière sèche (MS) est exprimée en % du produit frais ; les autres analyses sont exprimées par rapport au poids sec des composts. Ct : Carbone total ; Nt : Azote total ; Pt : Phosphore total ; Kt : Potassium total, Ca : Calcium ; Mg : Magnésium.

Les moyennes sur la même ligne qui ont la même lettre ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 % (Test de Fischer, LSD).

Composts

Les composts utilisés ont été produits à partir du mélange de déchets solides urbains biodégradables. Le compost 1 était produit à partir du mélange de 60% de déchets d'abattoir (DA) + 40% de déchet verts (DV), le compost 2 : 40% de DA + 20% de déchets de cuisine (DC) + 40% de DV, le compost 3 : 30% de DA + 30% de DC + 40% de DV, le compost 4 : 20% de DA + 40% de DC + 40% de DV, le compost 5 : 60% de DC + 40% de DV et le compost 6 : 100% de DV. Les principales propriétés des composts sont consignées dans le tableau 2.

Les teneurs en éléments chimiques étaient variables d'un compost à l'autre mais conformes aux critères de la norme NF U 44-051 (Agence Française de Normalisation (AFNOR), 2006). La teneur en azote total est basse. Les rapports C/N sont élevés indiquant que les composts sont des amendements organiques (Pouech, 2006). Les teneurs en phosphore total sont basses. Le pH est moyennement alcalin pour les composts 3, 6 et 4 et fortement alcalin pour les composts 5, 1 et 2.

Matériel végétal

La variété de sorgho, *Sorghum bicolor* (L.) Moench, CEF 382/2-1-1 (Sariaso 11) a été utilisée. C'est une variété sélectionnée assez résistante à la sécheresse (adaptée à la zone comprise entre les isohyètes 400 et 700 mm) et qui valorise bien la fumure organique. Son cycle est de 100 jours (Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), 1998).

Dispositif expérimental et modalités comparées

Le dispositif expérimental était constitué de 4 blocs de Fischer (36 m x 13 m chacun) comportant 14 traitements correspondant au total à 56 parcelles élémentaires (5 m x 4 m). Les allées entre les parcelles consécutives étaient de 1 m. Les blocs étaient dispersés mais les distances qui les séparaient étaient comprises entre 10 et 30 m.

Tableau 3 - Liste des traitements expérimentaux.

NUMEROS D'ORDRE DES TRAITEMENTS	DESIGNATIONS	ABREVIATIONS
1	Compost 1	C1
2	Compost 2	C2
3	Compost 3	C3
4	Compost 4	C4
5	Compost 5	C5
6	Compost 6	C6
7	Compost 1 + Urée	C1N
8	Compost 2 + Urée	C2N
9	Compost 3 + Urée	C3N
10	Compost 4 + Urée	C4N
11	Compost 5 + Urée	C5N
12	Compost 6 + Urée	C6N
13	Urée	N
14	Témoin absolu sans apport de fertilisant	TA

La prise en compte des traitements 7 à 12 se justifie par les faibles valeurs azotées des composts et le rôle de premier rang que joue cet élément dans le développement des cultures (Lamaze *et al.*, 1990).

Déroulement de l'essai et procédure d'échantillonnage du sol

L'essai a été conduit sur la même parcelle en 2010, 2011, 2012. L'apport des fertilisants a été réalisé à la levée des plants de sorgho, localisé au pied du plant à la dose de 3 t MS ha⁻¹ an⁻¹ pour les composts et 50 kg ha⁻¹ an⁻¹ pour l'urée. Le sorgho a été semé à la densité de 0,8 m x 0,4 m et démarré à trois plants par poquet une semaine après le semis. Les semis ont été effectués dans la première quinzaine de juillet de chaque campagne agricole. Chaque opération de semis était précédée d'un labour de

20 cm. Deux sarclages et un sarclo-buttage ont été effectués par saison agricole pour le contrôle des adventices. Les récoltes ont été effectuées en novembre de chaque année avec exportation totale de la paille et des récoltes. A la fin des 3 ans d'essai, une analyse physico-chimique d'échantillons de sol a été réalisée. Sur chaque parcelle (traitement), les prélèvements de sols et les mesures de densité apparente (D_a) ont été réalisés dans l'horizon 0-20 cm (Chopart, 1994). L'échantillonnage du sol a été fait à la tarière dans les interlignes centrales de semis à 20 cm des poquets. Huit prélèvements ont été effectués à l'intérieur de chaque parcelle. Ces prélèvements sont incorporés dans un seau plastique, puis mélangés plusieurs fois de façon à les rendre homogènes et 1 kg de sol est conditionné pour le laboratoire. Cinquante six échantillons composites (Aït-Houssa *et al.*, 2004) ont été ainsi constitués.

Les analyses ont été effectuées au Laboratoire des Moyens d'Analyse (LAMA) à Dakar pour le carbone total et aux laboratoires du BUNASOLS et de l'Institut de Recherches pour le Développement (IRD) à Ouagadougou pour la densité apparente et la terre fine.

Procédure de mesure des variables

Densité apparente

La méthode de mesure a consisté à utiliser un cylindre métallique de 200 cm³. Le cylindre est enfoncé dans le sol au point central de la parcelle à 20 cm du poquet de sorgho puis est récupéré de façon à minimiser le remaniement des sols. Les échantillons de sol, prélevés sur chacun des traitements ont été conservés dans des boîtes d'humidité préalablement tarées puis ont été séchés à l'étuve pendant 24 heures à 105°C pour déterminer la masse sèche. La densité apparente est déterminée par la formule :

D_a (g/cm³) = M (g)/V (cm³), avec, M = Poids sec de l'échantillon, V = Volume de l'échantillon.

Terre fine

La terre fine est la fraction de terre qui reste lorsqu'on retire les éléments grossiers (> 2 mm au tamis). La terre fine a été déterminée sur un échantillon de sol sec, après avoir séparé la fraction grossière de l'échantillon, Poids terre fine = (poids échantillon – poids éléments grossiers). Le taux de terre fine (en %) est obtenu par la formule :
 Tf (%) = (Poids terre fine / poids échantillon) x 100.

Carbone total

La méthode Walkley et Black (1934) a été utilisée pour déterminer la teneur en carbone total. Elle a consisté en une oxydation de l'échantillon de sol par le bichromate de potassium en poudre (K_2CrO_7) en présence d'acide sulfurique (H_2SO_4) porté à ébullition. L'excès du bichromate est mesuré au spectrophotomètre à 650 nm.

Stocks de carbone

Selon Arrouays *et al.* (2003) toute estimation des stocks de C du sol doit reposer sur des mesures ponctuelles, réalisées sur des prélèvements de sol. Pour calculer les stocks de carbone nous avons adopté la formule de Blanchart et Bernoux (2005) qui indique que le stock de C (en $t\ ha^{-1}$) d'un horizon de sol d'épaisseur "e" en (dm), à teneur en "C" (en $mg\ g^{-1}$ de sol), et dont la densité apparente est "da" (en $g\ cm^{-3}$) est calculé selon l'équation :

Stock C ($t\ ha^{-1}$) = C ($mg\ g^{-1}$ de sol) x da ($g\ cm^{-3}$) x e (dm) x taux de terre fine.

Dans le cadre précis de cette étude, l'on doit garder à l'esprit que la valeur du carbone stockée est une valeur à minima. Etant donné que la dynamique des composts (M.O) apportés va bien au-delà de la profondeur de 20 cm considérée (profondeur racinaire). Ceci au regard surtout du type (moyennement profond) de sol du site d'étude. En effet, investiguant sur le même sujet, et considérant une profondeur de 60 cm, Fan *et al.* (2014) ont noté que seulement un potentiel de stockage de 40% du carbone organique du sol était situé dans les 20 premiers centimètres du sol.

Analyses statistiques

Les données collectées ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à un facteur en utilisant le test des moindres carrés de Fischer (LSD) pour comparer les moyennes des différents paramètres sous divers composts. Le seuil de significativité a été défini à $P < 0,05$. Les comparaisons ont été faites selon trois niveaux : (i) les différents traitements de composts seuls avec le témoin, (ii) les différents traitements de composts couplés à l'urée avec le témoin et un traitement à base d'urée, (iii) les différents traitements de composts seuls avec ceux de composts couplés à l'urée. La corrélation de Pearson a été utilisée pour établir les relations entre les variables au seuil de 5%. Une modélisation des données par régression linéaire a été établie entre les variables pour lesquelles la corrélation de Pearson était statistiquement significative en vue de déterminer les équations des modèles. Le logiciel XLSTAT-Pro 7.5.2 (Addinsoft, 2004) a été utilisé pour ces analyses. Le tracé des graphiques a été réalisé avec le même logiciel.

Résultats

Variabilité de la densité apparente et du taux de terre fine

Les composts ont influencé la densité apparente du sol (Tableau 4). Le traitement C3 a montré la plus faible densité apparente, suivi, dans un ordre de densités apparentes croissantes, de C5, C4, C2, C1 et C6. Le traitement témoin a présenté la densité apparente la plus élevée. Les différences étaient significatives ($p < 0,05$) entre les traitements à l'exception de celles entre les traitements C6 et C1 ($p = 0,57$), C2 et C4 ($p = 0,20$), C5 et C3 ($p = 0,20$). Les traitements à base de composts couplés à l'urée ont présenté la dynamique suivante selon la valeur décroissante de la densité : N, C1N, C6N, C2N, C4N, C3N, C5N. Les différences étaient significatives ($p < 0,05$) à l'exception des différences entre les traitements N et TA ($p = 0,15$), C1N et C6N ($p = 0,23$), C2N et C4N ($p = 0,07$), C4N et C3N ($p = 0,054$), C3N et C5N ($p = 0,52$). Dans les traitements de composts couplés à l'urée la densité apparente a été moins élevée que celle des traitements de composts seuls. Les différences étaient statistiquement significatives entre C2 et C2N ($p = 0,04$), C4 et C4N ($p = 0,01$), C5 et C5N ($p = 0,002$), C6 et C6N ($p = 0,0004$) (Figure 2 A).

Les composts ont influencé le taux de terre fine du sol (Tableau 4). L'ordre de classement des composts était par ordre de taux décroissants de terre fine : C3 > C1 > C4 > C6 > C2 > C5 pour les traitements à base de composts seuls. A l'exception de C5, les différences étaient significatives ($p < 0,05$) entre le témoin et les autres traitements. Les traitements C3N, C1N, C4N, C6N, C2N, C5N, TA et N ont présenté des taux de terre fine décroissants dans cet ordre. Les traitements de composts couplés à l'urée ont donné des taux de terre fine plus élevés par rapport à ceux des traitements à base de composts seuls, les différences n'étaient cependant pas significatives ($p > 0,05$) (Figure 2B).

Variabilité de la teneur en carbone organique et du stock de carbone

Les composts ont eu un effet sur la teneur en carbone organique du sol (Tableau 5). Ce tableau indique que les composts C3, C2, C1, C4, C5 et C6 ont présenté des teneurs décroissantes en carbone organique dans cet ordre. Les différences entre les traitements n'étaient pas statistiquement significatives ($p > 0,05$). Les taux de variation par rapport au témoin fluctuaient entre -1 et +37%. Les traitements à base de composts couplés à l'urée ont présenté une dynamique semblable à celle des composts seuls, avec une 'amélioration de la teneur en carbone comparativement au témoin fluctuant entre 10 et 40%. Les différences entre les traitements n'étaient de même pas significatives ($p > 0,05$). Les traitements de composts couplés à l'urée ont présenté des teneurs plus élevées par rapport à celles des traitements à base de composts seuls,

Tableau 4 - Variabilité de la densité apparente et du taux de terre fine du sol sous composts seuls et sous composts couplés avec l'urée (Moyennes \pm écart type).

TRAITEMENTS	DENSITE APPARENTE (G CM ⁻³)	VARIATION VERSUS TA (%)	TERRE FINE (%)	VARIATION VERSUS TA (%)
C1	1,69b \pm 0,03	-4,5	69,48a \pm 3,56	28
C2	1,56c \pm 0,05	-11,8	64,77a \pm 8,58	19
C3	1,43d \pm 0,04	-19,0	70,11a \pm 2,57	29
C4	1,52c \pm 0,03	-13,7	67,36a \pm 9,72	24
C5	1,47d \pm 0,05	-17,0	62,10ab \pm 3,58	15
C6	1,70b \pm 0,02	-3,7	65,78a \pm 4,09	21
TA	1,77a \pm 0,04	0	54,21b \pm 2,54	0
C1N	1,63b \pm 0,02	-7,6	72,25a \pm 2,87	33
C2N	1,50c \pm 0,06	-14,9	68,75a \pm 8,57	27
C3N	1,39de \pm 0,01	-21,0	71,93a \pm 3,22	33
C4N	1,45cd \pm 0,05	-17,8	70,46a \pm 12,21	30
C5N	1,38e \pm 0,04	-22,0	66,30a \pm 4,49	22
C6N	1,60b \pm 0,02	-9,5	70,26a \pm 4,50	30
N	1,73a \pm 0,04	-2,3	53,45b \pm 4,47	-1
TA	1,77a \pm 0,04	0	54,21b \pm 2,54	0

Les chiffres affectés de lettres différentes dans la même colonne sont significativement différents au seuil de $p < 0,05$, selon le test de Fisher.

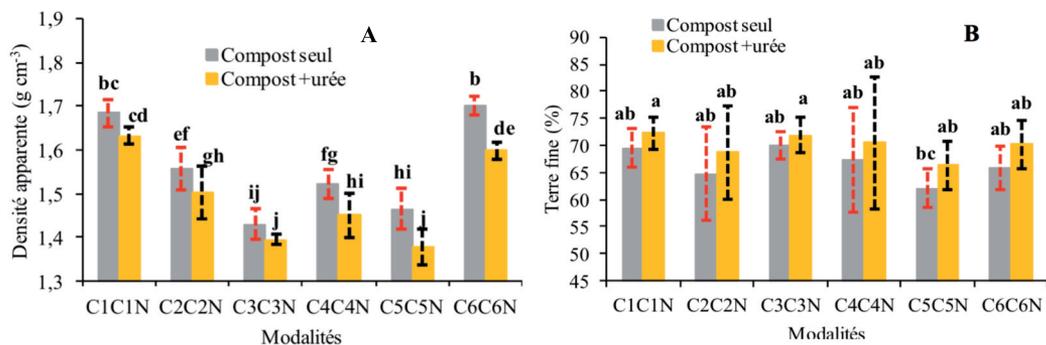


Figure 2 - Comparaison des modalités C et CN : Moyennes \pm écart type (A : Densité apparente ; B : Taux de terre fine).

Les paires d'histogrammes surmontés de lettres différentes indiquent une différence significative ($p < 0,05$) des moyennes.

toutefois, les différences entre les traitements n'étaient pas significatives ($p > 0,05$) (Figure 3 A).

Le stock de carbone du sol a varié en fonction du type de compost (Tableau 5). Ce tableau permet de constater que les traitements à base de composts seuls tels que C3, C1, C2, C6, C4 et C5 ont présenté des stocks de carbone décroissants dans cet ordre. Les améliorations de stock fluctuaient entre 8 et 42% comparativement au témoin. Les différences n'étaient pas significatives ($p > 0,05$) entre les traitements. Quand les composts étaient couplés à l'urée, le classement suivant a été observé par ordre de valeurs décroissantes de stock de carbone : C1N, C2N, C6N, C3N, C4N, N, C5N, TA. A ce niveau, les accroissements de stock variaient entre 3 et 60% par rapport au témoin. Les différences étaient significatives entre C1N et C5N ($p = 0,04$), C1N et TA ($p = 0,03$). Les traitements de composts couplés à l'urée ont présenté des stocks plus élevés par rapport à ceux des traitements à base de composts seuls pour C1N, C2N, C4N et C6N, les différences n'étaient pas significatives ($p > 0,05$) entre les traitements (Figure 3 B).

Tableau 5 - Variabilité du C org et du stock de carbone du sol sous composts seuls et sous composts couplés avec l'urée (Moyennes \pm écart type).

TRAITEMENTS	C ORG (%)	VARIATION VERSUS TA (%)	STOCK DE CARBONE (T HA ⁻¹)	VARIATION VERSUS (%)
C1	0,444a \pm 0,092	6	10,32a \pm 1,63	27
C2	0,508a \pm 0,117	21	10,06a \pm 1,43	24
C3	0,575a \pm 0,164	37	11,58a \pm 3,64	42
C4	0,443a \pm 0,129	5	8,91a \pm 2,29	9
C5	0,440a \pm 0,086	5	8,76a \pm 3,27	8
C6	0,416a \pm 0,150	-1	9,29a \pm 3,39	14
TA	0,421a \pm 0,143	0	8,14a \pm 3,12	0
C1N	0,550a \pm 0,158	31	13,07a \pm 4,33	60
C2N	0,588a \pm 0,116	40	12,34ab \pm 3,56	52
C3N	0,531a \pm 0,113	26	10,64ab \pm 2,22	31
C4N	0,489a \pm 0,142	16	9,65ab \pm 1,5	19
C5N	0,462a \pm 0,134	10	8,42b \pm 2,48	3
C6N	0,508a \pm 0,151	21	11,42ab \pm 3,61	40
N	0,483a \pm 0,180	15	8,95b \pm 3,37	10
TA	0,421a \pm 0,143	0	8,14b \pm 3,12	0

Les chiffres affectés de lettres identiques dans la même colonne ne sont pas significativement différents au seuil de $p < 0,05$, selon le test de Fisher.

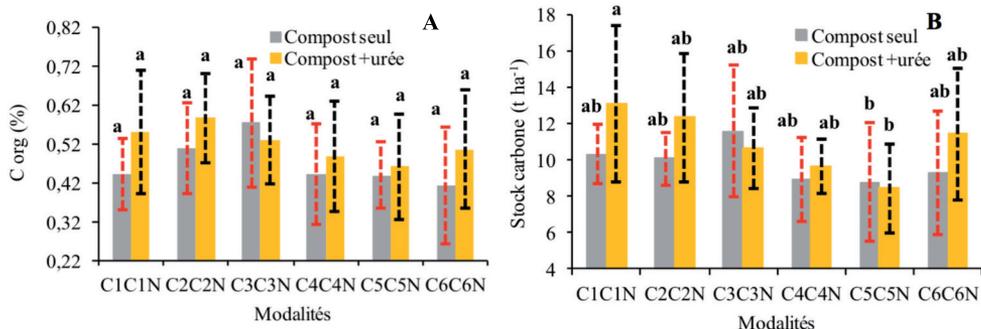


Figure 3 - Comparaison des modalités C et CN : Moyennes ± écart type (A : Carbone organique ; B : Stock de carbone).

Les paires d’histogrammes surmontés de lettres identiques indiquent une différence non significative ($p > 0,05$) des moyennes.

Relations entre les variables

Pour les traitements à base de composts seuls, le tableau 6 montre que le stock de carbone est lié au taux de carbone total ($r = 0,93$). L’équation du modèle de relation entre le stock de carbone et la teneur en carbone organique est : $\text{Stock carbone (t ha}^{-1}\text{)} = 9,05 + 18,46 \times \text{C org (mg g}^{-1}\text{)}$. La relation est hautement significative ($P < 0,0001$).

Tableau 6 - Corrélation (r de Pearson) entre les paramètres physico-chimiques du sol pour les traitements sous composts seuls.

VARIABLES	DENSITE APPARENTE	TERRE FINE	C ORG	STOCK CARBONE
Densité apparente	1,00	-0,34	-0,27	-0,14
Terre fine	-0,34	1,00	-0,05	0,22
C org	-0,27	-0,05	1,00	0,93
Stock carbone	-0,14	0,22	0,93	1,00

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil $\alpha=0,05$ (test bilatéral)

Pour les traitements à base de composts couplés à l’urée, le tableau 7 indique que le taux de terre fine est lié négativement à la densité apparente ($r = - 0,49$). Le stock de carbone est proportionnel ($r = 0,43$) au taux de terre fine. Le stock de carbone est proportionnel ($r = 0,92$) à la teneur en carbone organique.

Le tableau 8 résume les relations entre les variables relatives aux traitements à base de composts couplés à l’urée.

Tableau 7 - Corrélation (*r* de Pearson) entre les paramètres physico-chimiques du sol pour les traitements sous composts couplés à l'urée.

VARIABLES	DENSITE APPARENTE	TERRE FINE	C ORG	STOCK CARBONE
Densité apparente	1,00	-0,49	-0,07	0,02
Terre fine	-0,49	1,00	0,16	0,43
C org	-0,07	0,16	1,00	0,92
Stock carbone	0,02	0,43	0,92	1,00

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,05 (test bilatéral).

Tableau 8 - Equations des modèles de relation entre les paramètres physico-chimiques du sol pour les traitements sous composts couplés à l'urée.

EQUATIONS DES MODELES	PROBABILITES	SIGNIFICATIVITE
Densité apparente (g cm^{-3}) = $2,07 - 0,0078 \times \text{terre fine (\%)}$	0,004	S
Stock carbone (t ha^{-1}) = $1,20 + 1,55 \times \text{terre fine (\%)}$	0,01	S
Stock carbone (t ha^{-1}) = $-7,54 + 21,99 \times \text{C org (g/kg)}$	< 0,0001	Hs

S : Significatif ; Hs : Hautement significatif.

Discussion

Densité apparente et terre fine

Le compost a contribué à diminuer la densité apparente du sol. La densité apparente était plus élevée dans le témoin et faible sous composts seuls et encore plus faible sous composts couplés à l'urée. La densité apparente tient compte des vides existant entre les éléments du sol. Lorsqu'elle est élevée, la porosité est faible (Aggelides et Londra, 2000). Wong *et al.* (1999) ont observé une diminution de la densité apparente des sols ayant reçu un amendement de compost. Une étude au champ de Bazzoffi *et al.* (1998) portant sur un compost d'ordures ménagères a montré une réduction significative de la densité apparente du sol pour un apport de 60 t ha^{-1} durant l'année suivant l'apport. Ces auteurs attribuent la réduction de la densité apparente du sol observée à la présence de composés stables (humus) au sein du compost. Selon Aggelides et Londra (2000) cet humus augmente la porosité du sol d'où la baisse de la densité apparente. Zida *et al.* (2011) expliquent aussi l'augmentation de l'activité de la microfaune suite à l'apport de compost. Cette activité étant à l'origine de la création de macropores, réduisant du coup la densité apparente.

Le taux de terre fine était élevé sous composts seuls, encore plus élevé sous composts couplés à l'urée, par contre dans le témoin, le taux était moindre. L'accroissement du taux de terre fine pourrait s'expliquer par une activité biologique

plus intense sous compost, ce qui favoriserait la remontée des éléments fins des horizons plus profonds vers la surface. Par ailleurs, selon Watts *et al.* (2005) la matière organique des composts joue un rôle important dans la stabilisation des particules fines, réduisant ainsi les risques de leur lessivage. Selon Le Bissonnais *et al.* (2002), une agrégation stable procure une bonne structure au sol, une porosité plus élevée, et une protection contre l'érosion. Nos résultats sont conformes à ceux de Tejada et Gonzalez (2008) qui ont observé une diminution de la masse volumique apparente et une augmentation de la porosité et de la granulométrie fine suite à l'apport de compost urbains au sol.

Teneurs en carbone organique et stock de carbone

L'application de composts a augmenté les teneurs en carbone organique du sol, teneurs influencées par la qualité des composts. Le taux élevé de carbone organique sous les composts par rapport au témoin sans fertilisation s'expliquerait par la teneur des composts en composés lignifiés qui résistent à la minéralisation rapide (Francou, 2003). En effet, les composts avaient un C/N compris entre 14 et 25, ce qui selon Pouech (2006) est élevé. Par conséquent, leur apport au sol entraînerait une évolution lente de la matière organique avec un faible niveau de minéralisation. Il s'agit donc de composts à pouvoir amendant assez élevé (Francou., 2003). Werner *et al.*, 1988 ; Giusquiani *et al.*, 1995 ont fait les mêmes constats dans des études sur l'influence de divers composts sur les propriétés du sol. Mais ces auteurs ont précisé que les effets escomptés n'ont été perceptibles que dans le long terme avec de forte dose de compost.

La variabilité du stock de carbone en fonction du type de compost peut s'expliquer par la nature des composts qui ont montré des effets différentiels sur les paramètres tels que la densité apparente, le taux de terre fine, la teneur en carbone total, les stocks de C étant liés à ces paramètres (Arrouays *et al.*, 2003 ; Blanchart et Bernoux, 2005). Cette explication est d'autant plus plausible que les stocks les plus élevés ont été enregistrés sous les C3, C1, C2 puisque ce sont ces composts qui ont aussi montré plus d'effets positifs sur la densité apparente (C3), le taux de terre fine (C1, C3), la teneur en carbone total (C3, C1, C2). La production et l'accumulation de biomasse racinaire du sorgho peut aussi expliquer les variations des stocks de carbone en lien avec la nature du compost (Landry *et al.*, 2013). Les travaux sur les stocks de carbone du sol des agro systèmes en lien avec la fumure organique sont rares pour la zone d'Afrique subsaharienne. Hien *et al.* (2003) ont trouvé des valeurs de stock de C de l'ordre de 16 t ha⁻¹ dans l'horizon 0-30 cm dans une parcelle sous culture continue ayant reçu du fumier à la dose de 2 t MS ha⁻¹ an⁻¹ pendant 13 ans. Ces auteurs précisent qu'après 13 ans d'apport annuel de fumier, une augmentation de stock de C de 9 t ha⁻¹ a été constatée comparativement à une parcelle témoin sans apport de fumier. La différence avec nos résultats s'explique par la durée du test (13 ans), le climat (zone

soudanienne), le type de fumure organique (fumier), l'horizon du sol (30 cm) et la dose annuelle apportée ($2 \text{ t MS ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$). A Madagascar, sur un sol ferrallitique peu profond des stocks de C de 27 t ha^{-1} ont été relevés sur 0-30 cm sur une parcelle agricole (Grinand, 2010). Trochard et Bouthier (2013) ont trouvé en France que le stock de carbone organique du sol a augmenté de façon significative (+ 17% selon le produit) sur les 25 premiers centimètres du sol suite aux apports annuels de fumiers et de compost après 9 ans par rapport à une fertilisation minérale dans une parcelle de maïs.

Les différentes analyses ont indiqué que ce sont les composts 2, 3 et 4 qui ont été les plus performants. Cela s'expliquerait par le fait que ces composts intègrent dans leur matière première tous les trois substrats (DA, DC, DV) à des proportions différentes pour DA et DC. Ces trois composts présentent surtout une qualité de la matière C/N plus faibles et un N_t plus élevé. Donc plus de N (facteur limitant) disponible. Soit une mobilisation plus rapide, une production de biomasse racinaire plus élevée et par conséquent un carbone organique du sol plus élevé. Le compost 3 ayant une composition mieux équilibrée (30% DA, 30% DC et 40% DV) par rapport au compost 2 (40% DA, 20% DC et 40% DV) et au compost 4 (20% DA, 40% DC et 40% DV) a été le plus performant. Les travaux de Hugh (2005) ont montré que les meilleurs composts étaient ceux produits à partir de mélanges de substrats variés. En effet, les substrats étant de compositions chimiques différentes, plus ils sont variés et plus le compost généré renfermera ces éléments chimiques variés qui lui donneront une valeur agronomique plus efficace. Ce constat a été relevé par Znaïdi (2002) qui a trouvé que sur quatre types de mélanges de produits à composter, le meilleur compost a été obtenu avec le mélange constitué de quatre substrats différents comparativement aux autres composts issus du mélange de deux, trois ou d'un seul substrat.

Cette étude, menée après 3 ans d'expérimentation, a montré que l'application au sol de compost de déchets urbains induit dès les premières années un stockage du carbone dans le sol. La quantité moyenne de carbone supplémentaire stocké au bout des trois années a été estimée entre $0,62$ et $3,44 \text{ t ha}^{-1}$ selon le type de compost. Ainsi, dans les 20 premiers centimètres de sol, entre $0,21$ et $1,15 \text{ t ha}^{-1}$ de carbone supplémentaire peuvent être stockés par an, comparativement au mode traditionnel de culture sans apport de compost. Cette quantité évoluait de $0,09$ à $1,64 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ si le compost était combiné à de l'urée.

Relations entre les variables

Les valeurs de "r" sont comprises entre 0,43 et 0,93 ce qui signifie que les R^2 (coefficient de détermination) varient de 0,18 à 0,86 indiquant ainsi que les variables expliquent 18 à 86 % des variations des autres variables auxquelles elles sont corrélées. La corrélation n'est pas la causalité. Cependant les relations entre les paramètres pour

lesquels il y a un lien sont de bonne qualité comme l'ont montré les valeurs significatives à hautement significatives des probabilités. Blanchart et Bernoux (2005) ont observé en Martinique une corrélation positive entre stock de carbone et texture du sol. Leurs résultats ont montré que les sols sableux avaient des stocks de carbone plus faibles que ceux des sols argileux.

Conclusion

Les mesures effectuées à l'issue de trois années de tests consécutifs ont montré que les composts permettent d'améliorer les propriétés du sol et de lutter contre l'effet de serre additionnel en stockant du carbone dans le sol.

Le stock de carbone dans la couche superficielle du sol dépend du type de compost apporté. Les meilleurs composts ont été ceux produits à partir de mélanges diversifiés de substrats biodégradables avec en tête le compost produit avec 30% de déchet d'abattoir + 30% de déchet de cuisine + 40% de déchet vert. Ce compost avait la proportion de mélanges de substrats initiaux la plus équilibrée.

La ville de Ouagadougou produit actuellement 300 000 t de déchets solides par an (avec 76% de taux de collecte) dont 62,5% sont biodégradables soit 187 500 t. Cette matière biodégradable permet de produire en moyenne environ 93 750 t de compost brut (46 875 t de MS) (Kaboré *et al.*, 2011). A la dose de 3 t MS ha⁻¹ an⁻¹, ce compost permet de couvrir les besoins de 15 625 ha de terre et de stocker potentiellement entre $15\,625 \times 0,21 = 3\,281$ et $15\,625 \times 1,15 = 17\,969$ t de carbone par an. Ce carbone séquestré empêcherait l'émission de $3\,281 \times 3,67 = 12\,042$ à $17\,969 \times 3,67 = 65\,945$ t de CO₂ (IPCC, 1997) (1 kg de C équivaut à 3,67 kg de CO₂ car le passage entre carbone et dioxyde de carbone se base sur le rapport des masses) dans l'atmosphère contribuant ainsi à la lutte contre l'effet de serre additionnel.

Les stocks de carbone dans les sols sont difficiles à mesurer à cause de leur forte variabilité de répartition dans le sol (Arrouays *et al.*, 2003). Néanmoins, la démarche adoptée nous a permis d'atteindre des résultats rationnels. La poursuite des expérimentations est nécessaire pour mieux caractériser dans le long terme l'influence de cette pratique de gestion du sol sur la dynamique du carbone. Plusieurs auteurs Werner *et al.* (1988), Evanylo *et al.* (2008) ont signalé que l'effet des composts sur les propriétés du sol n'est perceptible que dans le long terme. Cette étude a été menée sur un type de sol précis, la prise en compte d'autres types de sol pourrait être envisagée. De plus, dans la perspective de séquestration du carbone, la gestion de la biomasse de sorgho pourrait être un paramètre à considérer.

Remerciements

Nous remercions les projets RIPIECSA (Recherche Interdisciplinaire et Participative sur les Interactions entre les Ecosystèmes, le Climat et les Sociétés d'Afrique de l'Ouest) et LMI-IESOL

(Laboratoire Mixte International-Intensification Ecologique des Sols Cultivés en Afrique de l'Ouest) pour leur appui financier lors des travaux de terrain et les analyses de laboratoires.

Références

- Addinsoft, 2004. XLSTAT-Pro 7.5.2. User's manual.
- AFNOR, 2006. Normes Françaises NF U44-051. Amendements organiques : dénominations, spécifications et marquage. AFNOR. Paris.
- Aggelides S.M., Londra P.A., 2000. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. *Bioresour. Technol.* 71: 253-259.
- Aït-Houssa A., Benbella M., Badraoui M., 2004. Eléments d'aide au raisonnement de l'échantillonnage du sol en parcelle agricole. *Rev. HTE* 129 : 20-29.
- Arrouays D., Feller C., Jolivet C., Saby N., Andreux F., Bernoux M. et Cerri C., 2003. Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps. *Etude et Gestion des Sols* 10 (4): 347-355.
- Bazzoffi P., Pellegrini S., Rocchini A., Morandini M. and Grasselli O., 1998. The effect of urban refuse compost and different tractors tyres on soil physical properties, soil erosion and maize yield. *Soil Tillage Res.* 48: 275-286.
- Bernoux M. et Chevallier T., 2013. Le carbone dans les sols des zones sèches. Des fonctions multiples indispensables. CSFD. France. 44p.
- Blanchart E. et Bernoux M., 2005. Déterminants des stocks de carbone des sols des petites Antilles (Martinique, Guadeloupe). Alternatives de séquestration du carbone et spatialisations des stocks actuels et simulés. MEDD. France. 104p.
- BUNASOLS, 1990. Manuel pour l'évaluation des terres. Document technique n°6. Ouagadougou. 181p.
- BUNASOLS, 1998. Etude morpho-pédologique de la province d'Oubritenga et du Kourweogo (échelle 1/50 000). Rapport technique. MA. Ouagadougou.
- Chopart J.L., 1994. Systèmes racinaires des cultures annuelles tropicales : effets du travail du sol sur les racines. Dans : *Le Travail du Sol pour une Agriculture Durable*, Hoogmoed, W.B., Klaj, M.C. (Eds.), pp. 27-34. Document FAO. Rome.
- CPCS, 1967. Classification des sols. ENSA. Grignon. 77p.
- Evanylo G., Sherony C., Spargo J., Starner D., Brosiusa M., Haering K., 2008. Soil and water environmental effects of fertilizer, manure and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system. *Agric. Ecosyst. Environ.* 127: 50-58.
- Fan J., Ding W., Xiang J., Qin S., Zhang J., Ziadi N., 2014. Carbon sequestration in an intensively cultivated sandy loam soil in the North China Plain as affected by compost and inorganic fertilizer application. *Geoderma* 230-231 : 22-28. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.03.027

- FEM-FIDA, 2002. S'attaquer à la dégradation des terres. FEM-FIDA. Rome. 9p.
- Fontès J. et Guinko S., 1995. Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Note explicative. Projet Campus 88 313 101. Ouagadougou. 67p.
- Francou C., 2003. Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains: Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage – Recherche d'indicateurs pertinents. Thèse d'INAPG, Grignon. 388p.
- Giusquiani P.L., Pagliai M., Gliotti G., Businelli D. and Benetti A., 1995. Urban waste compost: effects on physical, chemical, and biochemical soil properties. *J. Environ. Qual.* 24: 175-182.
- Grinan, C., 2010. Développement d'une méthode de spatialisation des stocks de carbone dans le sol à l'échelle régionale : Application à un projet REDD à Madagascar. SILAT. 47p.
- Hien E., Ganry F., Hien V., Oliver R., 2003. Dynamique du carbone dans un sol de savane du Sud-ouest Burkina sous l'effet de la mise en culture et des pratiques culturales. Dans : Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis, Jamin J.Y., Seiny Boukar L., Floret C. (Eds.). Actes du colloque Garoua. Cameroun.
- Hugh M., 2005. Introduction au compostage agricole. Fiche technique. MAA. Ontario. 12p.
- INERA, 1998. Fiche technique du sorgho CEF 382/2-1-1 (sarioso 11). Création INERA/CIRAD, Station de Recherche de Saria. INERA. Burkina Faso. 2p.
- INSD, 2008. Recensement général de la population et de l'habitation de 2006. MEF. Ouagadougou. 52p.
- IPCC., 1997. Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre - Version révisée 1996. Manuel simplifié - Module 6. Déchets. 42p.
- Kaboré W.T., Hien E., Zombré P., Coulibaly A., Houot, S., Masse D., 2011. Valorisation de substrats organiques divers dans l'agriculture périurbaine de Ouagadougou (Burkina Faso) pour l'amendement et la fertilisation des sols : acteurs et pratiques. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 15 (2) : 271-286.
- Kagambèga F.W., Traoré S., Thiombiano A. et Boussim J.I., 2011. Impact de trois techniques de restauration des sols sur la survie et la croissance de trois espèces ligneuses sur les « zipellés » au Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5(3): 901-914.
- Lamaze T., Khamis S., Foyer C., Farineau J., Valadier M.H., Morot-Gaudty J.F., 1990. Effet d'une limitation en N sur la photosynthèse chez le maïs. Dans : *Physiologie et production du maïs*, INRA (Eds.), pp. 113-121. Paris.
- Landry C., Boivin C., Belzile L., Mainguy J., 2013. Essais sur l'apport de différents types de matières organiques appliquées en bande à l'implantation d'un verger de cassis. IRDA. Canada. 50p.

- Le Bissonnais Y., Cros-Cayot S., Gascuel-odoux C., 2002. Topographic dependence of aggregate stability, overland flow and sediment transport. *Agronomie* 22: 489-501.
- Ouédraogo E., Mando A., Zombre N.P., 2001: Use of compost to improve soil properties and crop productivity under low input agricultural system in West Africa. *Agriculture Ecosystems and Environment* 84: 259-266.
- Pouech P., 2006. La valeur agronomique des composts : Synthèse bibliographique. ADAESO-APESA. France. 42p.
- Richer de Forges A.C., 2010. Lost in the triangular diagrams of soil texture. *Pedometron*. 14-17.
- Tejada M. et Gonzalez J.L., 2008. Influence of two organic amendments on the soil physical properties, soil losses, sediments and runoff water quality. *Geoderma* 145 (3-4): 325-334.
- Trochard R. et Bouthier A., 2013. Fertilité chimique du sol, 9 ans d'apports organiques enrichissent le sol. *Perspectives agricoles*. 404: 34-36.
- United Nations, 2008. World urbanization prospects: the 2007 revision. Department of Economic and Social Affairs/Population Division. New York.
- Walkley A. and Black A., 1934. An examination of the detjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of chromatic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.
- Watts C.W., Whaley W.R., Brookes P.C., Devonshire B.J and Whitmore A.P., 2005. Biological and physical processes that mediate micro-aggregation of clays. *Soil Science*. 170: 573-583.
- Werner W., Sherer H.W and Olfs H.W., 1988. Influence of Long-Term Application of sewage-sludge and compost from garbage with sewage-sludge on soil fertility criteria. *J. Agr. Crop Sci*. 160:173-179.
- Wong J.W.C., Ma K.K., Fang K.M. and Cheung C., 1999. Utilization of a manure compost for organic farming in Hong Kong. *Bioresource Technology*. 67: 43-46.
- WRB, 2006. World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. IUSS-ISRIC-FAO. Rome. 128p.
- Zida Z., Ouédraogo E., Mando A., Stroosnijder L., 2011. Termite and earthworm abundance and taxonomic richness under long-term conservation soil management in Saria, Burkina Faso, West Africa. *Appl. Soil Ecol*. 51: 122-129. DOI: 10.1016/j.apsoil.2011.09.001.
- Znaïdi I.E.A., 2002. Etude et évaluation du compostage de différents types de matières organiques et des effets des jus de composts biologiques sur les maladies des plantes. Master de CIHEAM- CTAB, Tunisie. 104p.
- Zougmoré R., Ouattara K., Mando A., Ouattara B., 2004. Rôle des nutriments dans le

succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso. *Sécheresse*. 15 (1) : 41-88.