



**HAL**  
open science

## Traitement de déchets ménagers par co-compostage avec la légumineuse *Cassia occidentalis* L. et quelques adjuvants de proximité pour améliorer la qualité agronomique de composts

Atalaèssou Bokobana, Outéndé Toundou, Lankondjoa Kolani, Kokou a A Amouzouvi, Edem Koledzi, Koffi K. Tozo, Gado Tchangbédji

### ► To cite this version:

Atalaèssou Bokobana, Outéndé Toundou, Lankondjoa Kolani, Kokou a A Amouzouvi, Edem Koledzi, et al.. Traitement de déchets ménagers par co-compostage avec la légumineuse *Cassia occidentalis* L. et quelques adjuvants de proximité pour améliorer la qualité agronomique de composts. *Environnement, Ingénierie & Développement*, 2017, N°73 - mai 2017, pp.1-13. 10.4267/dechets-sciences-techniques.3551 . hal-03159878

**HAL Id: hal-03159878**

**<https://hal.science/hal-03159878>**

Submitted on 4 Mar 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Traitement de déchets ménagers par co-compostage avec la légumineuse *Cassia occidentalis* L. et quelques adjuvants de proximité pour améliorer la qualité agronomique de composts

Atalaèssou Bokobana<sup>1,2,\*</sup>, Outendé Toundou<sup>1,2</sup>, Lankondjoa Kolani<sup>1</sup>,  
Kokou A. A. Amouzouvi<sup>1</sup>, Edem Koledzi<sup>1</sup>, Koffi Tozo<sup>1,2</sup>, Gado Tchangbedji<sup>1</sup>

(1) Laboratoire de Gestion, Traitement et Valorisation des Déchets (GTVD), Université de Lomé, BP 1515, Lomé-Togo.

(2) Laboratoire de Biotechnologies et de Physiologie Végétales, Université de Lomé, BP 1515, Lomé-Togo.

\*Auteur correspondant : bokoba3@yahoo.fr

## RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est d'améliorer la qualité agronomique de composts de déchets ménagers par co-compostage avec la biomasse d'une légumineuse envahissante au Togo, *Cassia occidentalis* L. et d'autres adjuvants comme le fumier, le phosphate naturel brut et la cendre de coques de grains de coton. Six composts ont été élaborés en cuve, l'un produit à partir de la fraction fermentescible de déchets ménagers collectée à la source, les autres associant différemment les adjuvants précités. La maturité et les qualités agronomiques du produit fini ont été déterminées suivant les analyses chimiques élémentaires, le dosage des acides humiques et fulviques, la spectroscopie UV-Visible et un test de phyto-toxicité. Les résultats ont montré que le pH reste légèrement acide à neutre pour les composts produits avec la biomasse de *Cassia* et un rapport C/N moyen de 20. Ces composts sont 1,5 fois plus riches en matières organiques notamment en acides humiques et retiennent environ 1,15 fois plus d'eau. Leur forte richesse en nutriments explique en partie leur forte salinité (4,37-4,60 mS.cm<sup>-1</sup>). Ils donnent les meilleurs taux de germination (93 %) à une dose de 25 %. Les teneurs en métaux lourds (Cu, Zn, Cd, Ni, Pb) sont largement inférieures aux normes internationales quel que soit le type de compost. Ainsi, le co-compostage des déchets ménagers avec la biomasse de *Cassia occidentalis*, le fumier, le phosphate naturel brut et la cendre, améliorerait de façon significative la composition du produit fini en éléments fertilisants majeurs et en acides humiques.

**MOTS-CLÉS :** compost, co-compostage, déchets ménagers, *Cassia occidentalis*

## ABSTRACT

This study aimed to improve the agronomic quality of standard composts drawn from household garbage, by co-composting with the biomass of an invading leguminous plant in Togo, *Cassia occidentalis* and other additives such as manure, natural raw phosphate, and the industrial ashes of cotton grains' shells. Six composts were made in a tank; One is the standard compost derived from household garbage while others were differently mixed with each of the aforementioned additives. The maturity and the fertilizer value of the finished products were assessed through basic chemical analyses, the dosage of the AH and AF, the Visible UV spectroscopy and a phytotoxicity test. The pH of the composts drawn from *Cassia* remained slightly acid with an average C/N ratio of 20. They were 1.5 times richer in organic matter, namely in humic acids and retained about 1.15 times more water. Their great richness in nutrients partially explains their high salinity rate (4.3-4.60 mS.cm<sup>-1</sup>). They had the best germination rate (93%) at a dose of 25%. The heavy metals (Cu, Zn, Cd, Ni, Pb) were largely inferior to international norms no matter the type of compost which is considered. Thus, the co-composting of household garbage with *Cassia occidentalis* biomass, manure, natural raw phosphate and ashes, significantly upgrades the composition of the finished products in major fertilizers and in humic acids.

**KEYWORDS:** compost, co-composting, urban waste, *Cassia occidentalis*

## Traitement de déchets ménagers par co-compostage avec la légumineuse *Cassia occidentalis* L. et quelques adjuvants de proximité pour améliorer la qualité agronomique de composts

Atalaëso Bokobana, Outendé Toundou, Lankondjoa Kolani,  
Kokou A. A. Amouzouvi, Edem Koledzi, Koffi Tozo, Gado Tchangbedji

### INTRODUCTION

Au Togo, plus de 50 % des terres cultivées sont dégradées à cause de leur sur-exploitation et de la disparition de la jachère sous la pression démographique (MERF, 2009). Cependant, à peine 16 % des exploitations reçoivent des engrais chimiques devenus trop coûteux (17 000 FCFA le sac de 20 kg) et peu disponibles dont l'usage génère des impacts environnementaux ou sanitaires potentiels. Lomé, la capitale du Togo, à l'instar des autres grandes villes des pays en développement, est confrontée à une augmentation importante de la production de déchets ménagers et industriels, due au développement des activités socioéconomiques, à la croissance démographique galopante des métropoles et à l'augmentation de la consommation de produits manufacturés. On estime à environ 800 tonnes la quantité de déchets produite chaque jour dans la seule commune de Lomé sur la base d'une production journalière de 0,91 kg/hab (Koledzi, 2011). Malgré les efforts de la municipalité à les résorber, les déchets s'amoncellent dans des décharges non contrôlées, des dépotoirs sauvages aux abords des rues ou même sont enfouis dans les bas-fonds aux périphéries de la ville. Pour autant, ces déchets sont majoritairement constitués de matière organique (72-80 % MS) et leur utilisation comme amendement après compostage permettrait de combler le déficit en matière organique des sols agricoles périurbains, de réduire leur dégradation voire d'améliorer leurs propriétés agronomiques (Pagliai *et al.*, 2004).

Ainsi, plusieurs études réalisées au Togo se sont intéressées au traitement par compostage et à la valorisation de la fraction organique des déchets de la ville de Lomé (Koledzi *et al.*, 2011), aux transformations de composts incorporés au sol (Tchegueni *et al.*, 2010) et à leurs effets sur les rendements de certaines cultures telles que le maïs, la tomate, la carotte, le chou et le haricot (Toundou *et al.*, 2014 ; Kolani, 2007). Cependant, les composts élaborés et analysés jusque-là par le laboratoire de Gestion, Traitement et Valorisation des Déchets (GTVD) restent insuffisamment riches en éléments fertilisants majeurs en particulier l'azote (0,3-0,8 %), le phosphore (0,03-0,06 %) et le potassium (0,40-0,6 %). A cet effet, le laboratoire a entrepris depuis une décennie, l'élaboration de nouveaux types de fertilisants, des engrais organo-minéraux, à base de la

fraction organique biodégradable de déchets ménagers, de biomasse végétale et sous-produits minéraux comme les phosphates naturels (source de phosphore) et les cendres (source de potassium).

*Cassia occidentalis* L. est une légumineuse qui pousse de manière envahissante au Togo (et dans d'autres pays au climat similaire) sur tous les terrains vagues et en friche. Elle est jusque-là connue uniquement pour ses propriétés thérapeutiques (Butare, 2003). L'analyse chimique de la biomasse aérienne de cette plante a révélé qu'elle est riche en azote ( $4,25 \pm 0,70$  %). Les travaux de Toundou *et al.* (2014) ont montré que cette biomasse utilisée sous forme d'engrais vert (biomasse entière enfouie dans le sol) permet d'améliorer de 26 % les teneurs des sols en azote. Cependant, cette pratique présente un risque de propagation de la plante invasive, à cause de la dissémination des graines. Par ailleurs, les communes côtières de la ville de Lomé produisent des quantités élevées de déchets d'ovins et caprins (25.600 tonnes/an) qui se caractérisent par des teneurs élevées en azote (0,96 %) et en potassium (1,81 %) (Kolani, 2007). Ce fumier est souvent utilisé en agriculture sans aucun traitement préalable. En outre, le Togo exploitant des minerais de phosphate contenant de l'ordre de 28,20 % de  $P_2O_5$  (Tchangbedji *et al.*, 2003), il paraît judicieux de chercher à enrichir en phosphore les amendements organiques. Les travaux de Koriko (2010) et de Tchangbedji *et al.* (2005) ont montré que la matière organique riche en substances humiques obtenue par compostage pourrait par sa faible dissolution améliorer la teneur en phosphore assimilable des composts. D'autre part, la nouvelle industrie oléagineuse du Togo (NIOTO) utilise les graines de coton pour l'extraction d'huile. Les coques issues du décorticage servent de combustible pour alimenter en énergie les turbines de l'usine. Ainsi estime-t-on à près de 1250 tonnes la production annuelle de cendre par la NIOTO qui constitue une source d'éléments minéraux (2,47 % de potassium) pour le compostage.

C'est dans un double souci d'enrichir les composts de déchets ménagers en azote, phosphore et potassium et de réfléchir sur la faisabilité du compostage comme voie de valorisation et de stabilisation des matières résiduelles précitées que ce projet de recherche a été conduit.

## I. Matériel et méthode

### I.1. Origine et échantillonnage des déchets et autres substrats

Près de deux tonnes de déchets ménagers ont été collectées directement à la source, auprès des ménages sur deux quartiers de la ville de Lomé, «Tokoin doumassé» et «Résidence du Benin», retenus pour leur proximité à la plateforme de compostage. Les déchets collectés ont été soigneusement triés à la main pour récupérer la matière organique fermentescible sur laquelle ont été réalisés les essais de compostage. La biomasse aérienne de *C. occidentalis* a été collectée dans divers quartiers périphériques de la ville de Lomé. Elle est ensuite grossièrement hachée, puis séchée à l'ombre. Le fumier a été collecté dans l'étable de la station agronomique de l'Université de Lomé. Il provient principalement des excréments de moutons et de chèvres. Le phosphate naturel brut est extrait de la mine de Hahotoé-Kpogamé (30 km à l'Est de Lomé). Le résidu phosphaté utilisé est un sous-produit minier valorisé dans

plusieurs programmes de fertilisation des sols au Togo. La cendre utilisée est issue de la combustion des déchets de graines de coton de la NIOTO. Une caractérisation physico-chimique de chacun des intrants compostés (Tableau 1) a été réalisée afin de mieux cerner leur apport sur les indicateurs de qualité du produit fini obtenu après compostage.

### I.2. Elaboration des composts et suivi du processus

Le compostage aérobie en cuve (technique expérimental du site) a été retenu. Cette technique a été jugée simple et adaptée à la quantité de matière à traiter. Les cuves de capacité 4,5 m<sup>3</sup> (2 m × 1,5 m × 1,5 m) sont construites en béton. Leur fond est étanche pour éviter les pertes en éléments solubles par lixiviation pendant l'arrosage, lequel est réalisé sous hangar afin de protéger les composts contre les pluies et l'excès de soleil. Il est en pente pour permettre l'écoulement des eaux excédentaires (lixiviats) vers des regards d'évacuation. Ceci évite la saturation des espaces lacunaires des parties basses du tas de déchets et

**Tableau 1. Caractérisation physico-chimique des substrats étudiés**

Paramètres	Fermentescibles	Fumier	Phosphate	Cendre	Biomasse de <i>Cassia</i>
<b>pH</b>	5,32 ± 1,0	8,37 ± 0,56	nd	nd	6,47 ± 0,80
<b>CE (ds.cm<sup>-1</sup>)</b>	7,80 ± 1,22	14,67 ± 0,16	nd	nd	8,72 ± 1,44
<b>H (%)</b>	73,45 ± 2,90	33,77 ± 2,13	nd	nd	25,40 ± 1,70
<b>MOT (%)</b>	79,45 ± 1,35	51,34 ± 1,47	nd	nd	65,13 ± 2,34
<b>COT (%)</b>	32,61 ± 1,44	28,12 ± 1,17	nd	nd	33,12 ± 1,32
<b>N t (%)</b>	1,85 ± 0,03	0,95 ± 0,02	nd	0,18 ± 0,02	4,25 ± 0,70
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b>	0,19 ± 0,01	0,26 ± 0,03	28,20*	2,53 ± 0,01	0,20 ± 0,012
<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>	nd	1,96 ± 0,02	2,60*	2,43 ± 0,02	9,01 ± 0,29
<b>CaO (%)</b>	nd	0,74 ± 0,031	35,80*	1,73 ± 0,04	0,47 ± 0,03
<b>NaO (%)</b>	nd	0,17 ± 0,02	2,80*	0,27 ± 0,03	1,32 ± 0,02
<b>MgO (%)</b>	nd	0,48 ± 0,04	3,80*	2,77 ± 0,01	0,94 ± 0,059
<b>Cd (ppm)</b>	2,36 ± 0,02	3,66 ± 0,49	49*	nd	45,54 ± 1,12
<b>Ni (ppm)</b>	35,14 ± 3,25	89,65 ± 2,35	nd	nd	33,49 ± 2,42
<b>Mn (ppm)</b>	254 ± 28,70	810,42 ± 37,78	74*	nd	142,33 ± 35,25
<b>Zn (ppm)</b>	210 ± 25,33	152,08 ± 35,06	35*	nd	166,08 ± 33,63
<b>Cu (ppm)</b>	135,54 ± 20,45	88,62 ± 3,45	45*	nd	115,20 ± 27,86
<b>Pb (ppm)</b>	418,13 ± 12,22	72,17 ± 5,03	nd	nd	57,83 ± 7,51

\*Tchangbedji *et al.* (2005). nd : non déterminé.

favorise ainsi une bonne aération (Kulcu et Yaldiz, 2004). Chaque cuve a reçu 600 kg de matières à composter (Tableau 2) déposées en trois couches de 200 kg. Les couches comprennent du bas vers le haut les déchets ménagers, la biomasse de *Cassia*, le fumier et le phosphate naturel. La cendre a été ajoutée un mois après le lancement du processus afin de ne pas faire chuter le rapport C/N en début du processus, facteur déterminant pour le bon déroulement du processus de biodégradation (Souidi, 2001). Durant le cycle de compostage, le contenu des cuves a été arrosé à 60 % du poids sec du substrat afin de maintenir les conditions optimales de décomposition (Finstein et Miller, 1985). Des retournements ont été réalisés les 2<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup>, 16<sup>ème</sup>, 30<sup>ème</sup>, 60<sup>ème</sup>, 90<sup>ème</sup> et 120<sup>ème</sup> jour pour aérer les tas et permettre à la matière soumise au processus de bien se dégrader. L'humidité élevée des matières fermentescibles compostées ainsi que la disponibilité du gisement en matières organiques justifient la fréquence des retournements dans les premières phases du processus.

Le suivi du processus a consisté en la mesure régulière de la température des tas (tous les 2 jours), de l'humidité (à chaque retournement), du pH (toutes les semaines) et du rapport C/N (toutes les deux semaines). Les températures des tas ont été mesurées en fin de matinée (entre 9H-10H) à l'aide d'un thermomètre électronique équipé d'une sonde de pénétration de 90 cm. L'évolution de l'humidité du massif en cours de compostage a été suivie par prélèvements lors des retournements d'échantillons qui sont pesés puis séchés à 105°C jusqu'à poids constant. Le pH des échantillons est déterminé sur une suspension aqueuse à un ration S/L de 1/5 (Belyaeva *et al.*, 2009). L'analyse de l'évolution des paramètres physico-chimiques, couplée à l'approche sensorielle notamment l'odeur et la couleur, ont permis d'estimer la maturité des composts. La durée de compostage a été de 150 jours.

### 1.3. Evaluation de certaines caractéristiques agronomiques des composts

L'échantillon de compost rapporté au laboratoire (0,5 kg) est un mélange de six prélèvements (par quartage) réalisés à mi-profondeur et à différents endroits du tas de manière à obtenir un échantillon aussi représentatif que possible. Le taux d'humidité est déterminé après séchage à 60°C à l'étuve jusqu'à poids constant (afin d'éviter la détérioration des composés organiques et la perte par évaporation des éléments minéraux). La capacité de rétention d'eau (CRE) est déterminée par élution goutte à goutte pendant 48 h (Pansu et Gautheyrou, 2003). Une partie des échantillons séchés a été broyée manuellement puis tamisée à 2 mm pour les analyses chimiques. La conductivité électrique (CE) et le pH sont déterminés sur un extrait aqueux 1/5 de la matière sèche broyée, après 15 minutes d'agitation magnétique. La matière organique totale (perte au feu 550°C pendant 4 heures), le carbone organique total (Walkley et Black), l'azote total Kjeldahl, le phosphore total (attaque à l'acide perchlorique), le phosphore assimilable (Bray-I) ont été déterminés. Les concentrations totales en K, Ca, Mg, et en éléments traces métalliques (Cu, Zn, Cd, Ni, Pb) ont été déterminées par spectrométrie d'absorption atomique, après minéralisation d'un échantillon de compost avec un mélange de HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub> et HF, et reprise des résidus avec du NO<sub>3</sub> et du HCl (SAA, 2003).

#### 1.3.1. Mesure de la stabilité et de la maturité des composts élaborés

La stabilité et la maturité du compost sont essentielles pour une utilisation optimale comme amendement et source de nutriments pour les plantes. Le degré de maturité du compost est estimé d'une part par le degré d'humification de la matière organique (dosage des acides humiques et fulviques, et spectroscopie UV-visible) et d'autre part par l'absence de préjudice pour les plantes suite à l'utilisation du compost (test de phytotoxicité).

**Tableau 2. Composition en intrants des tas**

Compost	Déchets ménagers	Fumier	Phosphate naturel	Cendre	Biomasse de <i>C. occidentalis</i>	TOTAL
	<b>kg</b>					
<b>C0</b>	600	0	0	0	0	600
<b>C1</b>	360	210	30	0	0	600
<b>C2</b>	300	210	30	60	0	600
<b>C3</b>	210	210	0	0	180	600
<b>C4</b>	150	210	30	60	150	600
<b>C5</b>	60	60	30	60	390	600

### 1.3.1.1. Dosage des acides humiques (AH) et fulviques (AF)

Le fractionnement chimique des AH et AF a permis de comparer le degré d'humification des matières organiques dans les composts élaborés. En effet, lors de l'humification des matières organiques, il y a formation d'AH par polymérisation d'AF ou par dégradation de substances non humiques de la fraction AF suivie de la formation de structures humiques poly-condensées AH (Jouraiphy *et al.*, 2005). L'humification des matières organiques se produit donc principalement à travers la fraction AH et peu à travers la fraction AF. Ainsi, le rapport AH/AF a souvent été proposé comme indicateur des processus d'humification et comme indice de maturité des composts (Huang *et al.*, 2006).

La méthode de fractionnement a été adaptée de celle utilisée par l'International Humic Substances Society (IHSS). Les acides humiques (AH) et fulviques (AF) sont extraits par agitation à l'aide d'un agitateur rotatif, durant 2 heures à partir de 10 g de compost additionnés à 100 mL de NaOH 0,1 M. Cette fraction soluble en milieu alcalin (AH+AF) est récupérée par centrifugation à 2500 rpm durant 25 min. La solution est alors acidifiée à pH 1 par ajout d'acide chlorhydrique HCl 6M. Après une nuit à +4°C, la fraction soluble en milieu acide (AF) d'acides fulviques est séparée de la fraction insoluble d'acides humiques (AH) par centrifugation à 10000 rpm durant 10 min. Les deux fractions sont séchées à l'étuve à 105°C pendant 48 heures.

### 1.3.1.2. Evaluation du degré d'humification

Plusieurs auteurs ont utilisé la spectroscopie UV-visible pour apprécier le degré d'humification de la matière organique décomposée. Selon Zbytniewski et Buszewski (2005), trois régions principales se retrouvent à l'intérieur de spectres d'extraits alcalins de composts : la région 260-280 nm correspond à la lignine et aux quinones, *i.e.* les matières en début de transformation ; les absorbances entre 460 et 480 nm répondent aux matières organiques en début d'humification ; et la région 600 - 670 nm correspond à des matières fortement humidifiées et condensées avec d'abondants groupes aromatiques. Suivant ce principe, plusieurs absorbances spécifiques (280, 472 et 664 nm) sont mesurées et permettent de calculer les rapports Q2/6 (DO280/DO664), Q4/6 (DO472/DO664) et Q2/4 (DO280/DO472) qui constituent des indices d'humification de la matière organique dissoute. De faibles valeurs des rapports Q2/Q6 et Q4/Q6 seront alors indicatrices d'une prédominance de matières organiques fortement humidifiées au sein du compost et révéleront clairement l'humification des matières organiques.

La méthode utilisée pour cette étude est adaptée de celle de Zbytniewski et Buszewski (2005) : 1 g de compost et 50 mL de NaOH 0,5 M sont agités pendant 2 heures. Une centrifugation (25 min, 3 000 rpm) est suivie de la mesure des absorbances spécifiques (280, 472 et 664 nm).

### 1.3.1.3. Tests de phytotoxicité

Il s'agit d'évaluer la maturité des composts en jugeant de l'absence de préjudice pour la plante (Chikae *et al.* 2007 ; Tang *et al.*, 2006). En effet, l'épandage d'un compost non mûr entraînerait une diminution du taux d'oxygène et du potentiel d'oxydoréduction du sol récepteur, pouvant provoquer la réduction des nitrates et la formation d'acides organiques (Bustamante *et al.*, 2008).

Pour évaluer la phytotoxicité des composts produits, vingt grains de maïs humides (variété IKENE) ont été mis en germination sur du sable seul, du compost seul, du sable + 25 % de compost et du sable + 75 % de compost (Zucconi *et al.*, 1981). Cinq répliques ont été réalisées. Après 10 jours d'incubation, le pourcentage de germination a été mesuré dans chaque essai et comparé à celui du témoin. Puis les essais ont été poursuivis sur une durée de 1 mois considérée suffisante pour juger de l'apparition ou non des adventices de *C. occidentalis*.

## 1.4. Analyses statistiques

Les résultats obtenus ont été traités statistiquement par analyse de variance ANOVA à l'aide du logiciel STATISTICA (version 6.0). Le test de Duncan a permis de classer les traitements par groupes homogènes au seuil de probabilité de 5 %.

## 2. Résultats et discussion

### 2.1. Evolution des paramètres du compostage

#### 2.1.1. Température et humidité

Le suivi de la température des composts a permis de retrouver les quatre principales phases de compostage : la phase mésophile (< 40°C), thermophile (40 à 70°C), refroidissement et maturation (Figure 1). L'augmentation des températures des tas pendant la première semaine du processus, serait la conséquence d'une forte activité microbienne induite par la présence de matières organiques facilement biodégradables (Charnay, 2005). La moyenne des pics thermiques est de 60-70°C pour les composts à *Cassia* contre 55-60°C pour les composts sans *Cassia*. Ces maximums de température sont atteints au bout de quatre jours pour les composts à *Cassia* contre huit jours pour les composts sans *Cassia*. En effet, constituée de feuilles courtes et abondantes, à tige lignifiée et fibreuse, *C. occidentalis* offre une très grande disponibilité en matière organique facilement biodégradable. La chaleur générée accélère la décomposition et favorise l'hygiénisation du substrat (Tognetti *et al.*, 2007).

Après la phase de fermentation chaude, les températures des composts diminuent graduellement sur environ douze semaines, pour demeurer constantes et inférieures à 35°C. Cette baisse

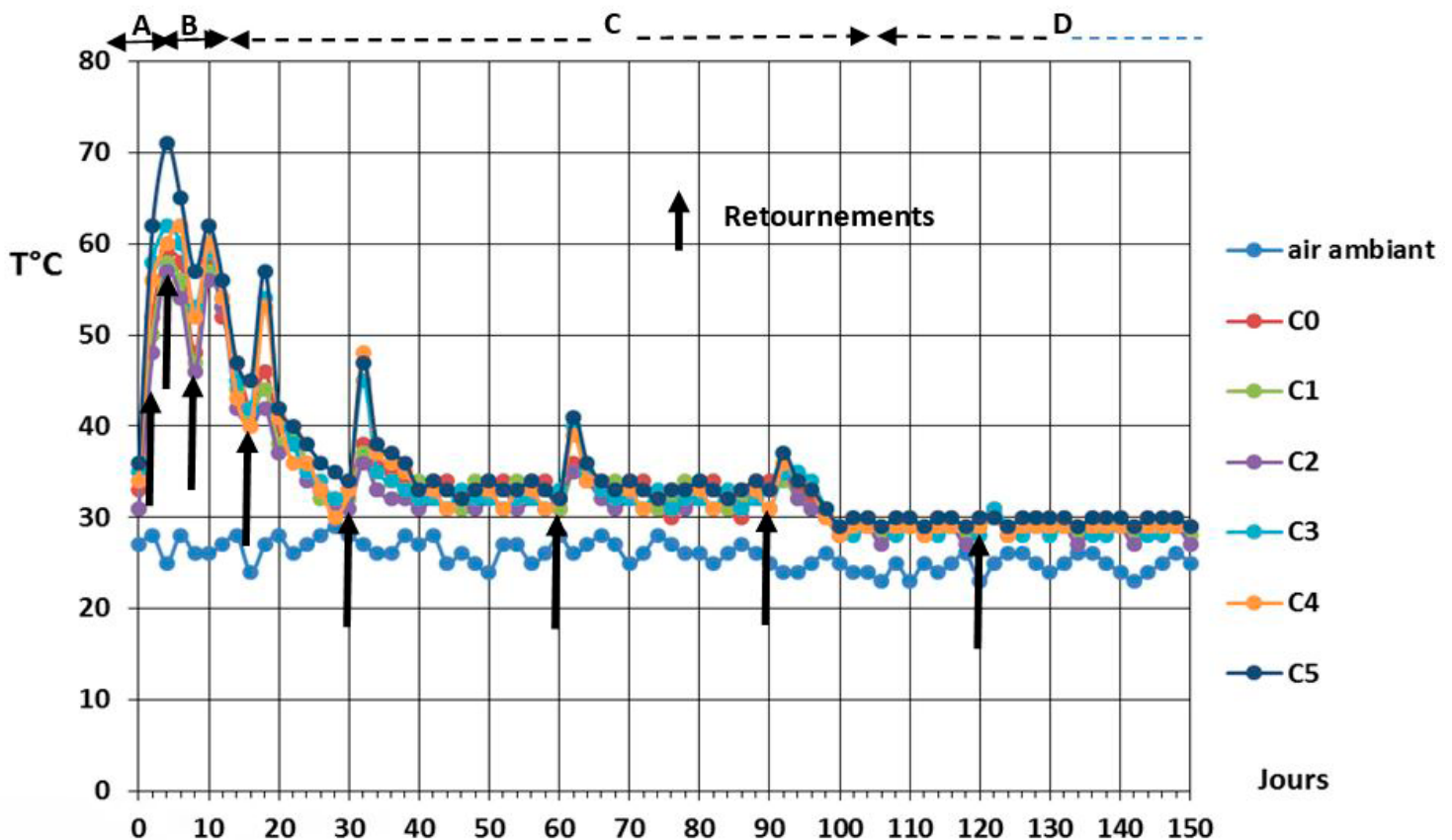
de température peut s'expliquer par un ralentissement de l'activité des micro-organismes dû à l'épuisement des matières organiques facilement biodégradables (Butler *et al.*, 2001). Bien que la température soit montée de très peu après le septième retournement, un retournement supplémentaire a été nécessaire pour vérifier si la décomposition était terminée. En effet, un épuisement en oxygène dans le comportement gazeux du tas de compost peut contribuer à la baisse de l'activité des micro-organismes et conduire à la production de méthane si des conditions d'anoxie sont atteintes.

L'action conjuguée de la montée thermique des tas et de l'aération due au retournement entraîne un assèchement de la matière (Francou, 2003). Ainsi, l'humidité des tas a graduellement diminué durant le premier mois du processus pour se stabiliser, en fin du processus, à 25-30 % (Figure 2).

### 2.1.2. pH

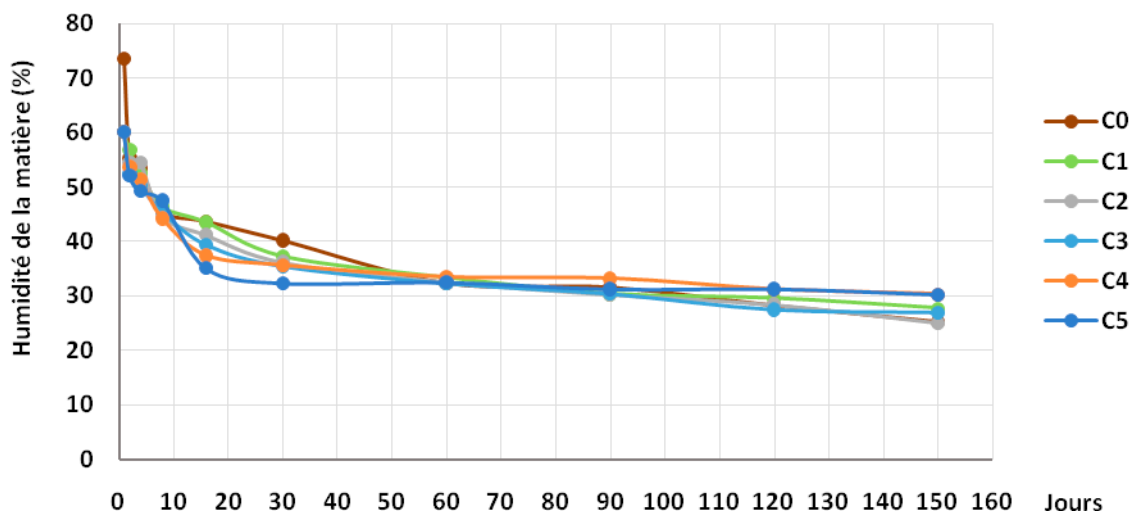
L'évolution du pH eau (Figure 3) montre clairement que les fermentations aérobies tendent à rendre le milieu basique. Le pH des six composts, légèrement acide au départ, diminue

d'environ 1 unité durant les deux premières semaines. Cette baisse du pH résulterait de la production d'acides organiques et du CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau sous forme d'acide carbonique (Sundberg, 2004). A partir de la deuxième semaine, le pH augmente d'environ 2 unités pour les composts sans *Cassia* et d'environ 2,5 unités pour les composts à *Cassia*. La composition du substrat de départ influence donc l'évolution du pH au cours du compostage. Cette alcalinisation du milieu peut être associée à la production d'ammoniac à partir de la dégradation des amines (Bernal *et al.*, 1998), à la libération des bases intégrées auparavant à la matière organique, et à la décomposition d'acides organiques (Haug, 1993). L'ammoniac ainsi généré neutraliserait en partie les substances acides (Francou, 2003). La stabilisation du pH à la fin du processus est attribuée à l'oxydation de l'ammonium par les bactéries et la précipitation du carbonate de calcium (Beck-Friis *et al.*, 2003). Les composts à *Cassia* obtenus sont légèrement acides à neutres (6,35–6,62) contrairement aux composts sans *Cassia* qui sont neutres à basiques (7,21–8,42).



**Figure 1. Evolution de la température durant la période de compostage. (A) Phase mésophile ; (B) Phase thermophile ; (C) Phase de refroidissement ; (D) Phase de maturation.**

C0 : déchets ménagers seul, C1 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut, C2 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut + cendre, C3 : déchets ménagers + fumier + biomasse de *Cassia*, C4 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut + cendre + biomasse de *Cassia*, C5 : déchets ménagers (moins) + fumier (moins) + phosphate naturel brut + cendre + biomasse de *Cassia* (plus).



**Figure 2. Evolution de l'humidité de la matière au cours du compostage**

C0 : déchets ménagers seul, C1 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut, C2 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut + cendre, C3 : déchets ménagers + fumier + biomasse de Cassia, C4 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut + cendre + biomasse de Cassia, C5 : déchets ménagers (moins) + fumier (moins) + phosphate naturel brut + cendre + biomasse de Cassia (plus).

## 2.2. Evaluation des valeurs agronomiques des composts

### 2.2.1. Capacité de rétention d'eau et conductivité électrique

Les composts à *Cassia* retiennent en moyenne 1,15 fois plus d'eau que le compost type de déchets (Tableau 3), ceci est dû à leur richesse en matières organiques et à la nature de ces dernières (Wong *et al.*, 1999). Les composts

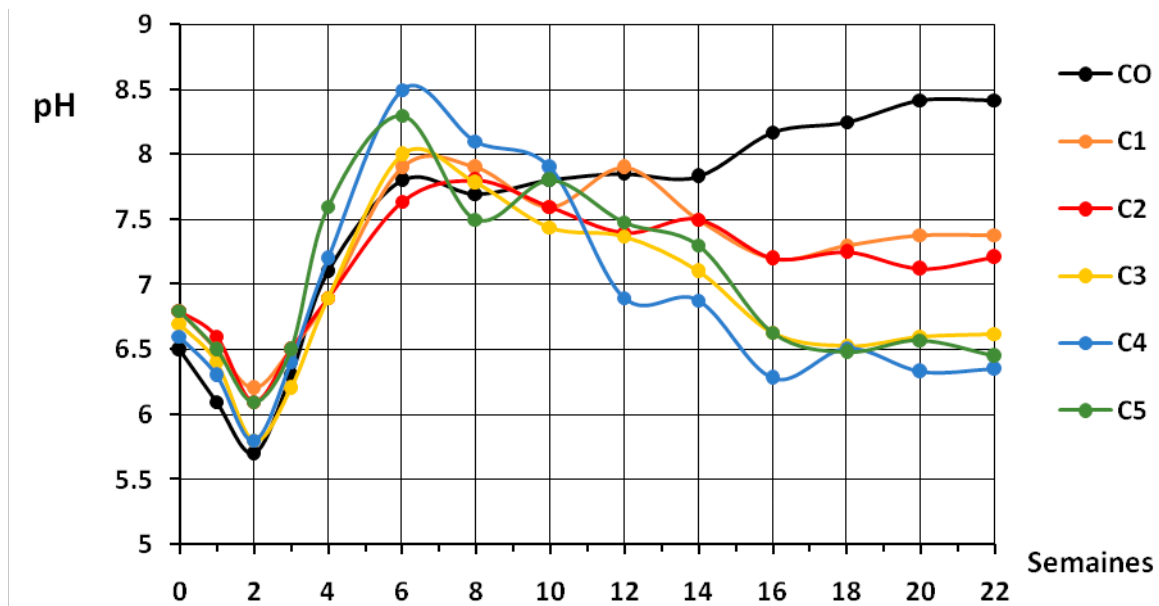
à *Cassia* C4 et C5 ont donné une salinité relativement plus forte (4,37 ; 4,60 mS.cm<sup>-1</sup>) due d'une part à leur forte concentration en nutriments (Saebo et Ferrini, 2006) et d'autre part à une forte dissolution des ions conducteurs sous l'effet de l'acidité du milieu (Chong et Purvis, 2006). Des salinités similaires ont également été obtenues par Guedira *et al.* (2011) sur des composts de la biomasse d'*Acacia mollissima*, de Chêne vert, de Pin d'Alep et de Cônes de Cèdre.

**Tableau 3. Caractéristiques physico-chimiques élémentaires des composts**

Compost	pH-H <sub>2</sub> O	%H	CRE (%)	CE (mS.cm <sup>-1</sup> )
<b>C0</b>	8,42 ± 0,09 <sup>a</sup>	27,33 ± 0,59 <sup>b</sup>	204,33 ± 6,03 <sup>d</sup>	01,31 ± 0,05 <sup>g</sup>
<b>C1</b>	7,38 ± 0,07 <sup>c</sup>	27,73 ± 1,23 <sup>b</sup>	147,97 ± 1,34 <sup>f</sup>	02,76 ± 0,07 <sup>d</sup>
<b>C2</b>	7,21 ± 0,04 <sup>d</sup>	25,01 ± 1,08 <sup>c</sup>	132,87 ± 1,34 <sup>g</sup>	03,11 ± 0,11 <sup>c</sup>
<b>C3</b>	6,62 ± 0,04 <sup>e</sup>	29,92 ± 0,63 <sup>a</sup>	216,59 ± 1,55 <sup>e</sup>	02,06 ± 0,05 <sup>e</sup>
<b>C4</b>	6,35 ± 0,04 <sup>f</sup>	30,33 ± 0,70 <sup>a</sup>	237,07 ± 2,06 <sup>b</sup>	04,44 ± 0,08 <sup>b</sup>
<b>C5</b>	6,45 ± 0,07 <sup>f</sup>	30,28 ± 0,98 <sup>a</sup>	249,61 ± 3,26 <sup>a</sup>	04,62 ± 0,07 <sup>a</sup>

Verticalement, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (Duncan,  $p \leq 0,05$ )  
 %H : humidité ; CRE : capacité de rétention d'eau ; CE : conductivité électrique  
 C0 : déchets ménagers seul, C1 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut, C2 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut + cendre, C3 : déchets ménagers + fumier + biomasse de Cassia, C4 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut + cendre + biomasse de Cassia, C5 : déchets ménagers (moins) + fumier (moins) + phosphate naturel brut + cendre + biomasse de Cassia (plus).





**Figure 3. Evolution du pH durant la période de compostage**

C0 : déchets ménagers seul, C1 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut, C2 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut + cendre, C3 : déchets ménagers + fumier + biomasse de Cassia, C4 : déchets ménagers + fumier + phosphate naturel brut + cendre + biomasse de Cassia, C5 : déchets ménagers (moins) + fumier (moins) + phosphate naturel brut + cendre + biomasse de Cassia (plus)

### 2.2.2. Teneurs en matière organique et en éléments fertilisants majeurs

Les composts à *Cassia* sont significativement plus riches en matière organique totale ( $P \leq 0,00017$ ) et en carbone organique total ( $P \leq 0,00017$ ) (Tableau 4), soit une augmentation moyenne d'environ 1,5 fois par rapport au compost type de déchets ménagers. La teneur en azote a significativement doublé ( $P = 0,0000$ ). Ces variations en teneurs d'azote et de matière organique des composts se répercutent sur le rapport C/N qui varie entre 15 et 23. Comme on s'y attendait, les composts à phosphate naturel brut présentent, presque dans le même ordre, des teneurs en phosphore total significativement plus élevées ( $P = 0,0000$ ), soit une augmentation moyenne d'environ 3 fois par rapport au compost type de déchets ménagers. Cependant, les composts contenant à la fois la biomasse de *Cassia* et le phosphate naturel brut (C4 et C5) donnent les teneurs en phosphore assimilable significativement plus élevées ( $P < 0,0001$ ). En effet, la nature acide des composts à *Cassia* augmenterait la solubilité du phosphate naturel brut (Koriko, 2010). Par ailleurs, l'utilisation du fumier, du phosphate naturel brut et de la cendre expliquerait les fortes teneurs en potassium, calcium et magnésium des composts C2, C4 et C5. Les proportions cumulées en éléments fertilisants majeurs des composts (Figure 4) montrent de fortes concentrations dans les composts à *Cassia* C4 et C5. Ainsi, la biomasse de *Cassia occidentalis*, associée à d'autres adjuvants tels le fumier, le phosphate naturel brut et la cendre améliorerait de façon significative la charge totale en éléments fertilisants majeurs d'un compost type de déchets ménagers.

### 2.2.3. Teneur en éléments traces métalliques (ETM)

Les déchets ménagers de la ville de Lomé sont chargés en éléments métalliques (Koledzi, 2011). Cependant, les teneurs en ETM des composts élaborés sont largement inférieures aux normes française et suisse (Tableau 5). Ceci serait dû à la collecte des déchets effectuée directement auprès des ménages et au tri minutieux effectué ensuite. La fraction fermentescible serait dans ces conditions moins exposée aux fractions réputées indésirables (métaux, plastiques, déchets spéciaux, verre, incombustibles non classés). Par ailleurs, il est établi que le compostage réduirait la disponibilité de métaux présents dans les déchets organiques (Pakou *et al.*, 2009). L'utilisation des six composts élaborés peut donc être acceptée pour les cultures alimentaires. Cependant, elle devrait être contrôlée dans la mesure où les applications répétées des composts pourraient avoir par accumulation de polluants, un effet perturbateur sur le fonctionnement biologique des sols (Houot *et al.*, 2009).

## 2.3. Degré de maturité et de stabilité des composts élaborés

### 2.3.1. Teneurs en acides humiques (AH) et fulviques (AF)

Le fractionnement chimique des AH et AF a permis d'évaluer la maturité des composts élaborés, sur la base du degré d'humification des matières organiques. Les composts à *Cassia*

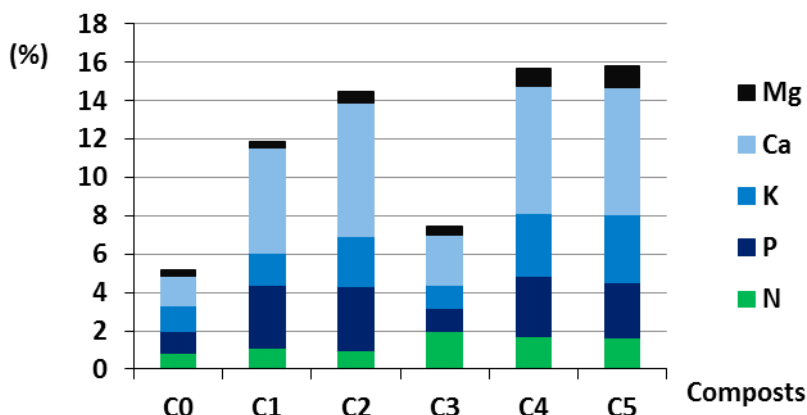


Figure 4. Proportions cumuléées en éléments fertilisants majeurs des composts ( $p \leq 0,05$ )

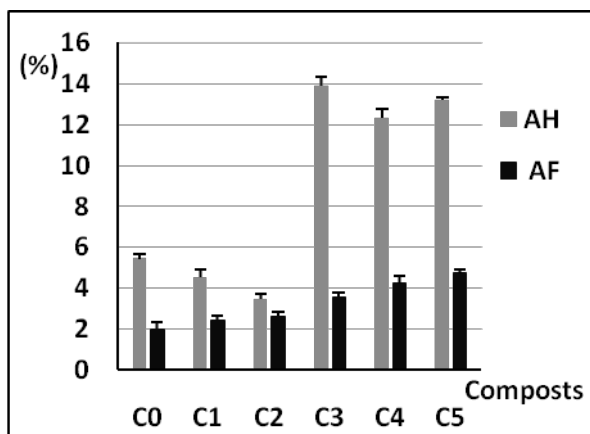


Figure 5. Teneurs en AH et AF des composts

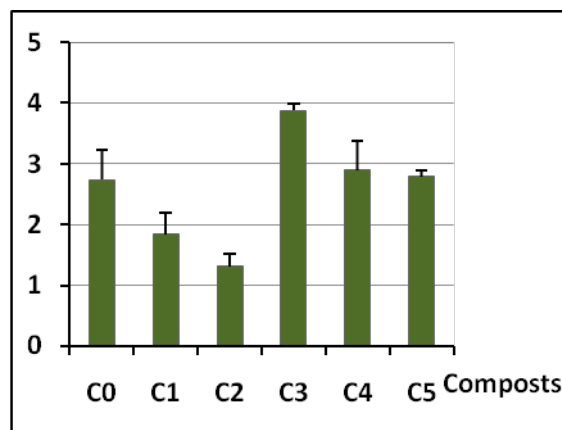


Figure 6. Rapport AH/AF des composts

renferment en moyenne 3 fois (respectivement 1,5 fois) plus d'AH (respectivement plus d'AF) que le compost type de déchets ménagers (Figure 5). La conséquence de ces tendances est une forte valeur du rapport AH/AF dans les composts à *Cassia* (Figure 6), caractérisant une matière organique plus stable et plus humidifiée (Campitelli *et al.*, 2006 ; Castaldi *et al.*, 2005). En effet, les résultats trouvés dans la littérature sont assez concordants avec des valeurs inférieures à 1 pour des composts immatures et supérieures à 1 ou 3 pour les composts mûrs (Francou, 2003 ; Hsu et Lo, 1999).

### 2.3.2. Caractéristiques spectrales des composts élaborés

Les analyses spectrales (UV-visible) rendent également compte de la maturité des composts, sur la base du degré d'humification des matières organiques. Les faibles rapports d'absorbances spécifiques  $Q_2/Q_6$  et  $Q_2/Q_4$  obtenues pour les composts à *Cassia* (Tableau 6) témoignent d'une plus forte concentration des matières organiques humidifiées (Chen *et al.*, 1977) et donc d'un processus d'humification plus

important (Zbytnewski et Buszewski, 2005 ; Domeizel *et al.*, 2004). Le ratio  $Q_4/Q_6$  ne présente pas de tendance claire mais reste dans l'ensemble inférieur à 5, valeurs assignées aux acides humiques (Stevenson, 1994 ; Chen *et al.*, 1977).

### 2.4. Test de germination

Le test de germination a permis d'évaluer la maturité des composts élaborés en jugeant de l'absence de préjudices pour la plante. L'incorporation d'une dose de 25 % de composts au sol donne les meilleurs taux de germination quel que soit le type de compost (Tableau 7). Ces résultats témoignent de la maturité des composts et de leur faible concentration en substances phytotoxiques (Chikae *et al.*, 2007). Cependant, la germination est réprimée avec l'augmentation de la dose de compost. Abad Berjon *et al.* (1997) ont signalé que l'effet répressif d'un compost n'est pas uniquement lié aux caractéristiques de celui-ci, mais aussi est fonction de la dose appliquée. Cet effet répressif lié à la dose est prononcé avec les composts à *Cassia*, sans doute lié à leur acidité (Keeling *et al.*, 1994). Ainsi, les apports au sol des composts à *Cassia* devraient

être mesurés et tenir compte des caractéristiques chimiques du sol. Par ailleurs, le risque d'apparition d'adventices de *Cassia* dans les composts à *Cassia* est écarté car aucune germination de graines de *C. occidentalis* n'a été observée même lorsque le suivi des essais de germination s'est poursuivi sur une durée d'un mois. En effet, les tas de compost chauffant à 60°C, combiné à la libération de facteurs biochimiques inhibiteurs au cours du compostage, assure la destruction des graines (Halberg, 1999).

## CONCLUSION

Les processus inhérents au co-compostage de déchets ménagers, de la biomasse de *Cassia occidentalis*, du fumier, du phosphate naturel brut et de la cendre ont été examinés dans cette étude de multiples manières et sous différents angles (analyse physico-chimique élémentaires ; dosage de AH et AF ;

Spectroscopie UV-Visible ; test de phytotoxicité). Il ressort que *Cassia occidentalis* ainsi que les autres adjuvants ont amélioré de façon significative la qualité et la maturité du compost produit à partir de la fraction fermentescible de déchets ménagers collectée à la source, en augmentant leurs teneurs en éléments fertilisants majeurs et en matières humiques. Les composts élaborés présentent des teneurs en métaux lourds largement inférieurs aux normes internationales. Au vu des analyses de toutes les variables physico-chimiques, les composts contenant tous les matériaux de base (composts C4 et C5) semblent les plus intéressants pour la valorisation en agriculture. Ceci ne pourra être confirmé que par des tests agronomiques.

Nos remerciements à la Fondation Internationale pour la Science (IFS) qui a financé cette étude et aux lecteurs du manuscrit pour leur contribution.

**Tableau 4. Teneurs en matière organique et en éléments fertilisants majeurs des composts**

Compost	MOT (%)	COT (%)	N-NTK (%)	C/N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> t (%)
<b>C0</b>	35,20 ± 1,70 <sup>c</sup>	21,23 ± 0,92 <sup>c</sup>	0,81 ± 0,10 <sup>e</sup>	26,4 ± 2,61 <sup>a</sup>	1,14 ± 0,20 <sup>c</sup>
<b>C1</b>	30,96 ± 1,89 <sup>d</sup>	19,59 ± 0,94 <sup>c</sup>	1,12 ± 0,23 <sup>cd</sup>	18,0 ± 3,99 <sup>c</sup>	03,23 ± 0,26 <sup>ab</sup>
<b>C2</b>	30,18 ± 1,84 <sup>d</sup>	14,92 ± 1,16 <sup>d</sup>	0,94 ± 0,06 <sup>de</sup>	15,92 ± 0,55 <sup>c</sup>	3,54 ± 0,25 <sup>a</sup>
<b>C3</b>	52,72 ± 2,81 <sup>a</sup>	34,17 ± 0,95 <sup>b</sup>	1,95 ± 0,10 <sup>a</sup>	17,52 ± 0,83 <sup>c</sup>	1,25 ± 0,12 <sup>c</sup>
<b>C4</b>	47,64 ± 2,54 <sup>b</sup>	33,98 ± 1,14 <sup>b</sup>	1,73 ± 0,04 <sup>b</sup>	19,71 ± 1,06 <sup>bc</sup>	03,13 ± 0,22 <sup>ab</sup>
<b>C5</b>	54,24 ± 1,40 <sup>a</sup>	36,89 ± 1,45 <sup>a</sup>	1,65 ± 0,02 <sup>b</sup>	22,35 ± 0,78 <sup>b</sup>	2,87 ± 0,31 <sup>b</sup>

Verticalement, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (Duncan,  $p \leq 0,05$ )

**Tableau 4 (suite). Teneurs en matière organique et en éléments fertilisants majeurs des composts**

Compost	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ass (%)	K <sub>2</sub> O (%)	CaO (%)	MgO (%)
<b>C0</b>	0,012 ± 0,001 <sup>d</sup>	1,34 ± 0,07 <sup>f</sup>	1,59 ± 0,14 <sup>f</sup>	0,28 ± 0,03 <sup>f</sup>
<b>C1</b>	0,037 ± 0,001 <sup>d</sup>	1,69 ± 0,02 <sup>d</sup>	5,51 ± 0,01 <sup>c</sup>	0,32 ± 0,01 <sup>e</sup>
<b>C2</b>	0,042 ± 0,001 <sup>c</sup>	2,61 ± 0,06 <sup>c</sup>	7 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,56 ± 0,01 <sup>c</sup>
<b>C3</b>	0,022 ± 0,001 <sup>e</sup>	1,17 ± 0,06 <sup>g</sup>	2,60 ± 0,01 <sup>d</sup>	0,48 ± 0,01 <sup>d</sup>
<b>C4</b>	0,183 ± 0,001 <sup>a</sup>	3,28 ± 0,05 <sup>b</sup>	6,59 ± 0,02 <sup>b</sup>	0,95 ± 0,01 <sup>b</sup>
<b>C5</b>	0,174 ± 0,001 <sup>b</sup>	3,53 ± 0,04 <sup>a</sup>	6,61 ± 0,02 <sup>b</sup>	1,13 ± 0,02 <sup>a</sup>

Verticalement, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (Duncan,  $p \leq 0,05$ )

**Tableau 5. Teneurs en ETM des composts élaborés**

Compost	Cu	Zn	Pb	Ni	Cd
	(mg.kg <sup>-1</sup> )				
<b>C0</b>	15,60 ± 0,56 <sup>g</sup>	127,23 ± 1,25 <sup>c</sup>	378,33 ± 36,12 <sup>a</sup>	41,49 ± 3,31 <sup>a</sup>	0,52 ± 0,1 <sup>c</sup>
<b>C1</b>	23,01 ± 1,72 <sup>d</sup>	150,48 ± 1,99 <sup>a</sup>	46,31 ± 1,20 <sup>c</sup>	14,75 ± 0,80 <sup>c</sup>	1,14 ± 0,1 <sup>b</sup>
<b>C2</b>	31,72 ± 0,74 <sup>c</sup>	113,8 ± 0,68 <sup>d</sup>	42,96 ± 0,95 <sup>d</sup>	14,28 ± 0,78 <sup>c</sup>	1,10 ± 0,1 <sup>b</sup>
<b>C3</b>	20,77 ± 1,11 <sup>e</sup>	97,29 ± 0,92 <sup>e</sup>	39,37 ± 1,07 <sup>e</sup>	05,34 ± 0,85 <sup>d</sup>	0,32 ± 0,1 <sup>c</sup>
<b>C4</b>	38,69 ± 1,44 <sup>b</sup>	149,46 ± 1,4 <sup>a</sup>	50,25 ± 0,97 <sup>b</sup>	15,11 ± 1,68 <sup>c</sup>	1,34 ± 0,1 <sup>ab</sup>
<b>C5</b>	42,66 ± 0,63 <sup>a</sup>	142,17 ± 1,08 <sup>b</sup>	45,89 ± 1,40 <sup>c</sup>	19,13 ± 1,83 <sup>b</sup>	1,58 ± 0,1 <sup>a</sup>
<b>Suisse</b>	100	400	120	30	2
<b>France</b>	100	300	180	60	3

Verticalement, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes (Duncan,  $p \leq 0,05$ )

**Tableau 6. Absorbances spécifiques UV-Visible d'extraits alcalins des composts**

Compost	Abs <sub>280</sub>	Abs <sub>472</sub>	Abs <sub>664</sub>	Q <sub>2</sub> /Q <sub>6</sub>	Q <sub>4</sub> /Q <sub>6</sub>	Q <sub>2</sub> /Q <sub>4</sub>
<b>C0</b>	2,178	0,41	0,085	25,62	4,82	5,31
<b>C1</b>	1,623	0,177	0,061	26,61	2,9	9,17
<b>C2</b>	1,56	0,163	0,053	29,43	3,08	9,57
<b>C3</b>	2,35	0,6	0,192	11,43	3,12	3,66
<b>C4</b>	2,142	0,581	0,169	12,67	3,44	3,69
<b>C5</b>	2,228	0,74	0,18	12,38	4,11	3,01

Q<sub>2</sub> : Abs<sub>280</sub> ; Q<sub>4</sub> : Abs<sub>472</sub> ; Q<sub>6</sub> : Abs<sub>664</sub>

**Tableau 7. Taux de germination des graines**

Compost	25 % de compost	75 % de compost	100 % de compost
<b>C0</b>	95 %	50 %	36 %
<b>C1</b>	87 %	55 %	45 %
<b>C2</b>	84 %	53 %	42 %
<b>C3</b>	95 %	31 %	23 %
<b>C4</b>	91 %	41 %	30 %
<b>C5</b>	93 %	38 %	27 %
<b>Sable seul (témoin)</b>		98 %	

## Références bibliographiques

- Abad Berjon M., Climent Morato M.D., Aragon Revuelta P., Camarero Simon A. (1997). The influence of solid urban waste compost and nitrogen –mineral fertilizer on grow the and productivity in potatoes. *Commun. Soil. Sci.Plant anal.*, 28, pp: 1653-1661. DOI : <https://doi.org/10.1080/00103629709369905>
- Beck-Friis B., Smars S., Jonsson H., Eklind Y., Kirchmann H. (2003). Composting of source-separated household organics at different oxygen levels: gaining and understanding of the emission dynamics. *Compost Science & Utilization*, 1, pp: 41-50. DOI : <https://doi.org/10.1080/1065657x.2003.10702108>
- Belyaeva O.N., Haynes R. (2009). Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash. *Bioresource Technology*, 100, pp: 5203-5209. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.032>
- Bernal M.P., Navarro M.A., Sanchez-Monedero M.A., Roig A., Cegarra J. (1998). Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(3), pp: 305-313. DOI : [https://doi.org/10.1016/s0038-0717\(97\)00129-6](https://doi.org/10.1016/s0038-0717(97)00129-6)
- Bustamante M.A., Paredes C., Marhuenda-Egea F.C., Perez-Espinosa A., Bernal M.P. Moral R. (2008). Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*, 72, pp : 551-557. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.03.030>
- Butare I. (2003). La biodiversité en Afrique de l'Ouest : Situation actuelle, expériences et perspectives. *Documentation de l'Atelier Régional sur la Biodiversité Agricole*, Centre de recherche et de développement international (CRD), Bamako, Mali, 15-19 Décembre 2003, 13 p.
- Butler T.A., Sikora L.J., Steinhilber P.M., Douglass L.W. (2001). Compost age and sample storage effects on maturity indicators of biosolids compost. *Journal of Environmental Quality*, 30, pp : 2141-2148. DOI : <https://doi.org/10.2134/jeq2001.2141>
- Campitelli P.A., Velasco M.I., Ceppi S.B. (2006). Chemical and physicochemical characteristics of humic acids extracted from compost soil and amended soil. *Talanta*, 69, pp: 1234-1239. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.12.048>
- Castaldi P., Alberti G., Merella R., Melis P. (2005). Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. *Waste Management*, 25, pp : 209-213. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.011>
- Charnay F. (2005). Compostage des déchets urbains dans les pays en développement : Elaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost. Thèse de Doctorat N° 56, Université de Limoges (France), 448 p.
- Chen Y., Senesi N., Schnitzer M. (1977). Information Provided on Humic Substances by E4-E6 Ratios. *Soil Science Society of America Journal*, 41, pp: 352-358. DOI : <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100020037x>
- Chikae M., Kerman K., Nagatani N., Takamura Y., Tamiya E. (2007). An electrochemical on-field sensor system for the detection of compost maturity. *Analytica Chimica Acta*, 581, pp: 364-369. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.08.030>
- Chong C. & Purvis P. (2006). Use of paper-mill sludges and municipal compost in nursery substrates. *International Plant Propagators' society, Combined Proceedings*, 55, pp : 428-432. En ligne : <https://rngrnet/publications/fnn/2007-winter/new-nursery-literature/use-of-paper-mill-sludges-and-municipal-compost-in-nursery-substrates-a9>
- Domezel M., Khalil A., Prudent P. (2004). UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost. *Bioresource Technology*, 94, pp : 177-184. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.11.026>
- Finstein M.S. & Miller F.C. (1985). Principles of composting lead to maximization of decomposition rate, control and cost effectiveness. In *Composting of Agricultural and other Wastes*. Ed: Gasser I.K.R., Elsevier Applied Science, pp : 13-26.
- Franco 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 de Doctorat, Institut national agronomique Paris- Grignon, 289 p. En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00000788/>
- Guedira A., Lamhamedi M. S., Satrani B., Boulmane M., Serrar M., Douira A. (2011). Valorisation des matières résiduelles et de la biomasse forestière au Maroc : Compostage et confection de substrats organiques pour la production de plants forestiers. *Nature & Technologie*, 07, pp : 87- 95. En ligne : [http://www.univ-chlef.dz/RevueNatec/Art\\_07\\_11.pdf](http://www.univ-chlef.dz/RevueNatec/Art_07_11.pdf)
- Haug R.T. (1993). The practical handbook of compost engineering. Boca Raton, Florida. 717 p.
- Houot S., Cambier Ph., Benoit P., Deschamps M., Jaulin A., Lhoutellier C., Barriuso E. (2009). Effet d'apports de composts sur la disponibilité de micropolluants métalliques et organiques dans un sol cultivé. *Étude et Gestion des Sols*, 16, pp: 255-274. En ligne : [http://www.afes.fr/afes/egs/EGS\\_16\\_3\\_houot.pdf](http://www.afes.fr/afes/egs/EGS_16_3_houot.pdf)
- Hsu J.-H. & Lo S.-Lm (1999). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. *Environmental Pollution*, 104, pp : 189-196. DOI : [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(98\)00193-6](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(98)00193-6)
- Huang G.F., Wu Q.T., Wong J.W.C., Nagar B.B. (2006). Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. *Bioresource Technology*, 97, pp: 1834-1842. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.08.024>

En ligne : <http://epublications.unilim.fr/theses/2005/charnay-florence/charnay-florence.pdf>

Chen Y., Senesi N., Schnitzer M. (1977). Information Provided on Humic Substances by E4-E6 Ratios. *Soil Science Society of America Journal*, 41, pp: 352-358. DOI : <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100020037x>

Chikae M., Kerman K., Nagatani N., Takamura Y., Tamiya E. (2007). An electrochemical on-field sensor system for the detection of compost maturity. *Analytica Chimica Acta*, 581, pp: 364-369. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.08.030>

Chong C. & Purvis P. (2006). Use of paper-mill sludges and municipal compost in nursery substrates. *International Plant Propagators' society, Combined Proceedings*, 55, pp : 428-432. En ligne : <https://rngrnet/publications/fnn/2007-winter/new-nursery-literature/use-of-paper-mill-sludges-and-municipal-compost-in-nursery-substrates-a9>

Domezel M., Khalil A., Prudent P. (2004). UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost. *Bioresource Technology*, 94, pp : 177-184. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.11.026>

Finstein M.S. & Miller F.C. (1985). Principles of composting lead to maximization of decomposition rate, control and cost effectiveness. In *Composting of Agricultural and other Wastes*. Ed: Gasser I.K.R., Elsevier Applied Science, pp : 13-26.

Franco 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 de Doctorat, Institut national agronomique Paris- Grignon, 289 p. En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00000788/>

Guedira A., Lamhamedi M. S., Satrani B., Boulmane M., Serrar M., Douira A. (2011). Valorisation des matières résiduelles et de la biomasse forestière au Maroc : Compostage et confection de substrats organiques pour la production de plants forestiers. *Nature & Technologie*, 07, pp : 87- 95. En ligne : [http://www.univ-chlef.dz/RevueNatec/Art\\_07\\_11.pdf](http://www.univ-chlef.dz/RevueNatec/Art_07_11.pdf)

Haug R.T. (1993). The practical handbook of compost engineering. Boca Raton, Florida. 717 p.

Houot S., Cambier Ph., Benoit P., Deschamps M., Jaulin A., Lhoutellier C., Barriuso E. (2009). Effet d'apports de composts sur la disponibilité de micropolluants métalliques et organiques dans un sol cultivé. *Étude et Gestion des Sols*, 16, pp: 255-274. En ligne : [http://www.afes.fr/afes/egs/EGS\\_16\\_3\\_houot.pdf](http://www.afes.fr/afes/egs/EGS_16_3_houot.pdf)

Hsu J.-H. & Lo S.-Lm (1999). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. *Environmental Pollution*, 104, pp : 189-196. DOI : [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(98\)00193-6](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(98)00193-6)

Huang G.F., Wu Q.T., Wong J.W.C., Nagar B.B. (2006). Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. *Bioresource Technology*, 97, pp: 1834-1842. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.08.024>

- Jouraphy A., Amir S., El Gharous M., Revel J.-C., Hafidi M. (2005). Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 56, pp: 101-108. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2005.06.002>
- Keeling A.A., Paton I.K. et Mullet J.A., (1994). Germination and growth of plants in media containing unstable refuse derived compost. *Soil Biol. Biochem.*, 26, pp: 767-772. DOI : [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90271-2](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90271-2)
- Kolani L. (2007). Effets des différents types de compost élaborés à base de coques de graines de coton sur le rendement en grain de maïs. Mémoire d'ingénierie, Ecole Supérieure d'Agronomie (ESA), Université de Lomé, 91 p.
- Koledzi K.E. (2011). Valorisation des déchets solides urbains dans les quartiers de Lomé (Togo) : Approche méthodologique pour une production durable de compost. Mémoire de Thèse de Doctorat, 224 p. En ligne : <http://www.theses.fr/2011LIMO4002>
- Koledzi K.E., Baba G., Tchangbedji G., Agbeko K., Matejka G., Feuillade G., Bowen J. (2011). Experimental study of urban waste composting and evaluation of its agricultural valorization in Lomé (Togo). *Asian Journal of Applied Sciences*, 4 (4), pp: 378-391. DOI : <https://doi.org/10.3923/ajaps.2011.378.391>
- Koriko M. (2010). Extraction, caractérisation, réactivité chimique des substances humiques naturelles avec les phosphates de Hahotoé-Kpogamé et leurs propriétés photodégradantes. Thèse de doctorat, Université de Lomé, 159 p. En ligne : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00719333>
- Kulcu R. & Yaldiz O. (2004). Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. *Bioresources Technology*, 93, pp : 49-57. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.007>
- MERF (2009) Plan d'action national d'adaptation aux changements climatiques (PANA). Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières, Togo, 113 p. En ligne : [http://www.ecowrex.org/system/files/repository/2009\\_pana\\_togo\\_-\\_pnud.pdf](http://www.ecowrex.org/system/files/repository/2009_pana_togo_-_pnud.pdf)
- Halberg N. (1999). Indicators of resources use and environmental impact for use in a decision aid for Danish livestock farmers. Cité par ITAB (2001) in : *Guide des matières organiques. Tome 1. Deuxième édition 2001*. En ligne : <https://core.ac.uk/download/pdf/10926826.pdf>
- Pagliai M., Vignozzi N., Pellegrini S. (2004). Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, 79, pp: 131-143. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.002>
- Pakou C., Kornaros M., Stamatielatu K., Lyberatos G. (2009). On the fate of LAS, NPEOs and DEHP in municipal sewage sludge during composting. *Bioresour. Technol.*, 100, pp : 1634-1642. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.025>
- Pansu M. & Gautheyrou J. (2003). L'analyse du sol - minéralogique, organique et minérale, Springer-Verlag, 995 p.
- SAA (Spectrophotométrie d'Absorption Atomique) (2003). Manuel d'opération, Cambridge, United Kingdom.
- Saebo A. & Ferrini F. (2006). The use of compost in urban green areas - A review for practical application. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4, pp : 159-169. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.003>
- Soudi B. (2001). Compostage des déchets ménagers et valorisation du compost. Cas des petites et moyennes communes au Maroc. (Actes éditions), 102 p.
- Sundberg C., Smars S., Jonsson H. (2004). Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource Technology*, 95, pp: 145-150. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.01.016>
- Stevenson F.J. (1994) Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions. second ed., John Wiley & Sons eds, New York, 521 p.
- Tang J.C., Maie N., Tada Y., Katayama A. (2006). Characterization of the maturing process of cattle manure compost. *Process Biochemistry*, 41, pp: 380-389. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.06.022>
- Tchangbedji G., Djeteli G., Kili K., Savariault J.M., Lacout J.L. (2003). Chemical and structural characterization of natural phosphate of hahotoé (Togo). *Bull. Chem. Soc. Ethiop.*, 17(2), pp: 139-146. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/bcse.v17i2.61659>
- Tchangbedji G., Baba G., Agbeko K., Bailly J.R., Lacout J.L. (2005). Monitoring of natural phosphate dissolution during composting process. *Phys. Chem. News.*, 23, pp: 124-127
- Tchegueni S., Kili K.A., Bodjona M.B., Tchchangbedji G., Baba G., Hafidi M. (2010). Valorisation par compostage des déchets d'agrumes issus des préparations de jus : Caractérisation physico-chimique. *Bulletin d'Information de la SOACHIM*, 007, pp: 61 - 69.
- Tognetti C., Mazzarino M.J., Laos F. (2007). Co-composting biosolids and municipal organic waste: effects of process management on stabilization and quality. *Biol. Fertil. Soils*, 43, pp : 387-397. DOI : <https://doi.org/10.1007/s00374-006-0164-8>
- Toundou O., Tozo K., Amouzou K.A.A., Kolan L., Tchchangbedji G., Kili K., Gnon B. (2014). Effets de la biomasse et du compost de *Cassia occidentalis* L. Sur la croissance en hauteur, le rendement du maïs (*Zea Mays* L.) et la teneur en NPK d'un sol dégradé en station expérimentale. *European Scientific Journal*, 10 (3), pp: 294-308. En ligne : <http://ejournal.org/index.php/esj/article/view/2630>
- Wong J.W.C., Ma K.K., Fang K.M., Cheung C. (1999). Utilization of a manure compost for organic farming in Hong Kong. *Bioresource Technology*, 67(1), pp: 43-46. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00066-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00066-8)
- Zbytniewski R. & Buszewski B. (2005). Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part I: chemical and spectroscopic properties. *Bioresource Technology*, 96, pp: 471-478. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.018>
- Zucconi F., Forte M., Monaco A., de Bertoldi M. (1981). Biological evaluation of compost maturity. *BioCycle*, 22 (2), pp: 27-29.