
Valorisation des déchets d'origine végétale et industrielle par compostage

Abdelilah Meddich¹, Fatima-Zohra Elouaqoudi², Ahmed Khadra¹, Widad Bourzik³

1. *Laboratoire Biotechnologie et Physiologie Végétale, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad de Marrakech BP 40 001, Maroc
a.meddich@uca.ma*
2. *Laboratoire Ecologie et Environnement, Faculté des Sciences Semlalia Université Cadi Ayyad de Marrakech, BP 40 001, Maroc*
3. *Service Environnement Wilaya de la Région Marrakech-Safi Rue 11 Janvier, Marrakech, Maroc*

RÉSUMÉ. Notre étude a visé le compostage de certains déchets d'origine végétale et industrielle et leur valorisation agronomique. Le choix des déchets à composter et les mélanges effectués est justifié par leur abondance importante, leur impact négatif sur l'environnement, leur richesse en éléments minéraux ou en matière organique avec un rapport C/N favorable pour une bonne activité microbiologique. À différents stades du compostage, nous avons mesuré les paramètres physico-chimiques pour évaluer la biodégradation des déchets notamment la température, le pH, le carbone organique, l'azote et les taux de cendres. La majorité des mélanges des déchets étudiés ont atteint leur maturité et leur stabilité après 3 mois de compostage. Les composts produits ont été testés pour leur effet sur la croissance du palmier dattier et des cultures sous-jacentes telles que l'orge, le blé et la luzerne. Les faibles doses de composts sont bénéfiques pour la biomasse des plantes.

ABSTRACT. The objective of our study is to investigate the composting of some plants and industrial wastes and their agricultural use. The choice of wastes to compost and mixtures is justified by their abundance and their impact on the environment, their high minerals or organic matter with a C/N ratio favorable for microbiological activity. At different stages of composting, we measured the physical and chemical parameters to evaluate the biodegradation of wastes including temperature, pH, organic carbon, nitrogen and ash content. The majority of the prepared mixtures have reached maturity and stability after 3 months of composting. Compost products have been tested for their effect on growth of date palm and other underlying crops such as barley, wheat and alfalfa. Low doses composts were found to be beneficial for plant biomass.

MOTS-CLÉS : sécheresse, dégradation des sols, composts, palmier dattier et cultures sous-jacentes, amélioration de croissance.

KEYWORDS: drought, soil degradation, composts, date palm and underlying crop, growth enhancement.

DOI:10.3166/RCMA.26.451-469 © Lavoisier 2016

Extended abstract

High-quality food production has influenced agricultural practices around the world. The intensification of these practices in order to satisfy the increasing needs of the populations and the intensive use of chemical fertilizers for quantitative and qualitative production have led to the degradation and depletion of cultivated soils. Moreover, in Morocco, the combination of socio-economic development and population growth has been accompanied by an increase in waste such as liquid effluents and solid (olive-pomace) from the olive sector, phosphogypsum and sludge from phosphate wastes and green waste from maintenance of green spaces. These huge amounts of different types of accumulated wastes remain without any treatment and no valorization method adapted to the Moroccan context has been committed. The implementation of landfills for wastes elimination could be considered as wastage of raw materials and may cause serious damage to the environment.

Currently, recycling organic matter and biodegradable compounds has become an important environmental act for the restoration of the soil ecosystem and for the improvement of crop yields.

For this reason, the aim of our study is to investigate the possibility to treat various agro and industrial wastes by aerobic processes for further agronomic valorization. This process of composting has double interest by mitigating the environmental impact of wastes and recycling these deposits of organic matter in major natural cycles.

To assess the biodegradation of wastes at different stages of composting, we monitored the main physico-chemical parameters including temperature, pH, organic carbon, nitrogen and ash content. Mixtures of OCOMWWG (olive cakes olive mill waste water and Garbage), GW (grass scrap alone) and GWSP (grass - phosphate sludge) reached maturity and stability after 3 months of composting with a C / N ratio <19. On the other hand, date palm substrates (DP) and DPGW required more composting time to achieve a good level of stability.

During composting and for almost all used wastes, pH undergoes a slight increase. Similarly, the rate of ash increases with higher values in the case of the DP and DPGW than for other tested mixtures (GW, GWDL and OCOMWWG). On the other hand, the ratio $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ has decreased to low values (< 1) after 3 months of composting for GW, GWDL, GWSP and OCOMWWG mixtures. A decrease of this ratio indicates a significant oxidation of organic matter and a good maturity of composts.

The use of the different composts has clearly favored the growth of date palms and underlying tested crops such as barley, wheat and alfalfa. A variation of this plant growth was noted as a function of the dose of the applied compost. Low doses of composts were found to be beneficial for plant biomass.

1. Introduction

L'appauvrissement des sols en matière organique est une caractéristique commune des sols méditerranéens en particulier dans le contexte pédo-climatique aride et semi-aride (Mallard *et al.*, 2006 ; Abouelwafa, 2009). L'apport excessif des engrais minéraux pour l'amélioration des rendements des cultures ne cesse d'accélérer et d'aggraver la détérioration de la qualité des sols en diminuant de plus en plus leurs teneurs en matière organique. Par ailleurs, la conjonction du développement socio-économique et de l'accroissement démographique au Maroc a contribué à l'augmentation des déchets solides produits essentiellement par les ménages, les industries et les établissements de santé. Certains types de déchets industriels sont générés au Maroc en permanence et en quantité importante, notamment les effluents liquides (margines) et solides (grignons d'olive) du secteur oléicole, les phosphogypses et les boues de lavages des phosphates. En outre, l'entretien des espaces verts de la ville de Marrakech génère des quantités importantes des déchets verts qui sont évacués à la décharge.

Ces énormes quantités de déchets de différents types sont accumulées et restent sans aucun traitement et aucune filière de valorisation adaptée au contexte marocain n'a été engagée. La mise en décharge pour l'élimination de ces déchets demeure un gaspillage inutile des matières premières et cause des dommages extrêmes sur le plan environnemental. Le traitement des déchets est devenu ainsi une nécessité primordiale pour la protection de l'environnement (Oueslati *et al.*, 1995). La réutilisation durable de ces déchets dans l'agriculture sous forme de fertilisants organiques ou de substituts de tourbe est une approche intéressante en raison de ses implications environnementales et économiques (Zhang et Sun, 2016).

Parmi les principales solutions économiques et écologiques, figurent le compostage, une méthode éco-technologique, puisqu'elle permet le retour de la matière organique aux sols et donc sa réinsertion aux grands cycles écologiques vitaux (Francou, 2003). Cette technique de transformation des déchets solides biodégradables en milieu aérobie est économiquement peu coûteuse et plus rentable (Ruggieri *et al.*, 2009). Elle constitue une alternative environnementale adaptée pour la transformation des matières organiques en composts et/ou fertilisants organiques de haute qualité (Shak *et al.*, 2014). L'amendement des sols par les composts améliore leurs caractéristiques physico-chimiques et stimule la croissance des plantes (Tejada *et al.*, 2009). Le compost enrichit la matière organique des sols par des molécules organiques, des produits de dégradation diversifiés et des substances humiques qui améliorent la structure du sol par interaction avec les minéraux et par agrégation des particules d'argile et augmentent ainsi sa stabilité par la formation de micro-agrégats (Stevenson, 1994 ; Clapp *et al.*, 2001 ; Seul *et al.*, 2009).

Cette matière organique apportée diminue la masse volumique et favorise la pénétration et la croissance racinaire en améliorant la nutrition, la photosynthèse et la biomasse végétale (Schnitzer et Poapst, 1967 ; Nardi *et al.*, 1996 ; Rauthan et Schnitzer, 1981). De même, le compost augmente la capacité d'échange cationique et la rétention en eau des sols en assurant une bonne circulation de l'eau et en limitant son lessivage (Giusquiani *et al.*, 1995 ; Takeda *et al.*, 2009 ; Nyembo *et al.*,

2014). Les composts stimulent également l'activité des micro-organismes et accélèrent ainsi le cycle des éléments et l'altération minérale. La décomposition progressive mobilise des quantités importantes en macroéléments et en oligoéléments nécessaires à la nutrition des plantes (Clapp *et al.*, 2001).

Dans cette optique, le présent travail a pour objectif, le traitement des déchets précités d'origine végétale et industrielle par des bioprocédés aérobies en andains et leur valorisation agronomique. Ce procédé de compostage des déchets présente le double intérêt d'atténuer leurs impacts environnementaux et de recycler ces gisements de matières organiques dans les grands cycles naturels. Nous étudions également l'effet des fertilisants organiques produits sur la croissance et le développement du palmier dattier et des cultures sous-jacentes notamment l'orge, le blé et la luzerne.

2. Matériaux et procédure expérimentale

2.1. Matières premières utilisées

Les matières premières utilisées pour la conduite de nos essais sont :

– Les déchets des palmiers dattiers, des chiendents et des feuilles mortes sont issus de l'entretien des espaces verts de la commune urbaine de Marrakech (Maroc).

– Les déchets de grignons d'olive et des margines ont été fournis par la société Marrakech Food Groupe Agozal localisée à la zone industrielle du quartier sidi Ghanem de la ville de Marrakech.

– Les ordures ménagères ont été fournies par des snacks et des maisons.

– Les boues de lavage des phosphates naturels utilisées dans cette étude proviennent de la station d'El Youssofia relevant de l'office chérifien des phosphates au Maroc. C'est un sous-produit composé de fluorapatite, des argiles, du quartz et des carbonates. Les caractéristiques physico-chimiques de ces boues sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Composition physico-chimique des boues des phosphates naturels

Ph	8,49
Conductivité (ms/cm)	0,58
Taux de cendres (%)	96,00
Matière organique (%)	4,00
Carbone total (%)	2,00
Azote total (%)	0,073
Phosphore assimilable (%)	0,0853
Phosphore total en %	21,64
CaO (%)	39,26

2.2. Préparation des composts et conditions environnementales

L'ensemble des essais a été conduit le 15 septembre 2015 dans une plateforme de compostage constituée d'une charpente métallique de 2 400 m² de superficie, au niveau de la pépinière communale urbaine de Marrakech (température externe moyenne de 15,68 °C, humidité relative moyenne de 47,17 % et lumière de 295 $\mu\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$). Les mélanges humectés à 60-70 % d'humidité sont déposés sur des bâches en plastique pour éviter les écoulements et les phénomènes de lessivage lors de l'humectation des mélanges et sont couverts par d'autres bâches percés de même nature afin de réduire l'évaporation et le dessèchement des andains, ainsi que les déperditions de chaleur. Pour assurer l'aération des andains au cours du processus de compostage, des brassages réguliers et manuels sont assurés à l'aide des fourches et des pelles jusqu'à la fin du compostage. Après chaque brassage, des prélèvements des échantillons ont été effectués à différents niveaux des andains (profond, surface, côté, centre), selon le principe de la méthode de quartage (AFNOR, 1999).

2.3. Paramètres mesurés

Nous avons mesuré les paramètres physico-chimiques des mélanges des déchets utilisés et des composts produits. L'aspect agronomique des composts obtenus a été évalué par la mesure de la biomasse des plantes largement cultivées au Maroc notamment, le palmier dattier, l'orge, la luzerne et le blé.

Un suivi de l'évolution de la température est effectué quotidiennement par la mesure de ce paramètre à différents niveaux des andains à l'aide d'un thermomètre à sonde métallique. La température de l'andain est la moyenne de 6 mesures effectuées à chaque côté de l'andain et à différentes profondeurs (100 cm, 70 cm et 30 cm). Le pH est mesuré par la méthode électrométrique à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 10 g d'échantillon frais dans 20 ml d'eau distillée.

Le taux de cendre est déterminé par calcination d'un échantillon préalablement séché dans un four à moufle à une température de 600 °C pendant 6 heures. L'augmentation de la température doit être réalisée par palier thermique (105 °C [1 heure], 200 °C [1 heure], 600 °C [6 heures]), pour éviter la destruction brutale de la matière organique qui entraîne des pertes de matière au niveau du four.

Le carbone organique total est dosé par l'oxydation de la matière organique à froid par un excès de bichromate de potassium $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ en présence de l'acide sulfurique concentré selon la méthode d'Anne décrite par Aubert (1978).

La mesure de l'azote total est basée sur la transformation de l'azote organique en azote ammoniacal. L'échantillon subit une minéralisation par l'acide sulfurique concentré en présence du catalyseur Kjeldahl, puis l'ammoniac formé est déplacé par NaOH (40 %). Ensuite, l'ammoniac entraîné par la vapeur d'eau est fixé par l'acide borique et titré avec l'acide sulfurique. La teneur NTK est déterminée par l'unité de distillation Velp-UDK132 selon le protocole décrit par Rodier, 1984.

Les teneurs d'ammonium sont déterminées selon la méthode Kjeldahl (AFNOR, 1975) à partir d'échantillon frais (2 g) par distillation en milieu alcalin avec 10 ml de soude 40 %. Les nitrates sont réduits à travers une colonne de cadmium granulé en nitrites qui sont dosés colorimétriquement. Après 30 minutes de réaction avec le réactif de diazotation, la mesure de nitrate se fait au spectrophotomètre à 537 nm.

La réponse des plantes testées en absence et en présence du compost a été évaluée par la détermination de la masse sèche (MS), un indicateur fiable de la biomasse, mesurée après séchage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures. Tous les résultats ont été analysés statistiquement avec le logiciel CO-STAT (Statistical Software, New Anova Style). L'étude comprend une analyse de variance suivie du test de Newman et Keuls au seuil de 5 %.

3. Résultats et discussion

3.1. *Caractéristiques physico-chimiques des mélanges des déchets au cours du compostage*

Le suivi de l'évolution de la température en fonction du temps au cours du compostage des différents substrats et mélanges réalisés est présenté sur la figure 1. La biodégradation peut être évaluée par la température des composts qui montre des variations durant les différentes étapes du processus de compostage. La nature des substrats influence la prolifération microbienne responsable des variations de la température (El ouaqoudi, 2015). Les courbes de température ont la même allure excepté dans le cas des déchets de palmiers seuls (DP) où l'augmentation de température était lente et progressive à partir du deuxième mois pour atteindre une valeur maximale de 43 °C au troisième mois. Pour les autres déchets y compris celui DPCh, la température a augmenté rapidement dès les premiers jours du compostage pour atteindre, des valeurs maximales variant de 56 °C à 69 °C. Par la suite, la température diminue graduellement pour atteindre des valeurs entre 30 °C et 40 °C.

Au démarrage du compostage des déchets testés, l'élévation progressive de la température (inférieure à 45 °C) durant la première phase mésophile, résulte de la chaleur dégagée lors de la dégradation des composés facilement assimilables par les micro-organismes mésophiles notamment les bactéries et les champignons qui dégradent les molécules simples comme les sucres et les acides aminés ainsi qu'une partie des molécules complexes telles que les lipides et les protéines (Mustin, 1987). L'élévation de la chaleur dégagée au cours de cette phase dépend de la nature des déchets compostés et le type d'isolement du milieu extérieur (Ahn *et al.*, 2009).

L'augmentation de la température à l'intérieur de la masse à composter permet l'installation des microorganismes thermotolérants durant la phase thermophile (Viel, 1989). Au cours de cette phase la température peut atteindre 60 °C à 75 °C, ce qui provoque l'arrêt de l'activité des microorganismes qui ne résistent pas aux températures élevées comme les champignons ; par contre elle favorise le développement des bactéries thermophiles et neutralise les organismes pathogènes (Francou, 2003).

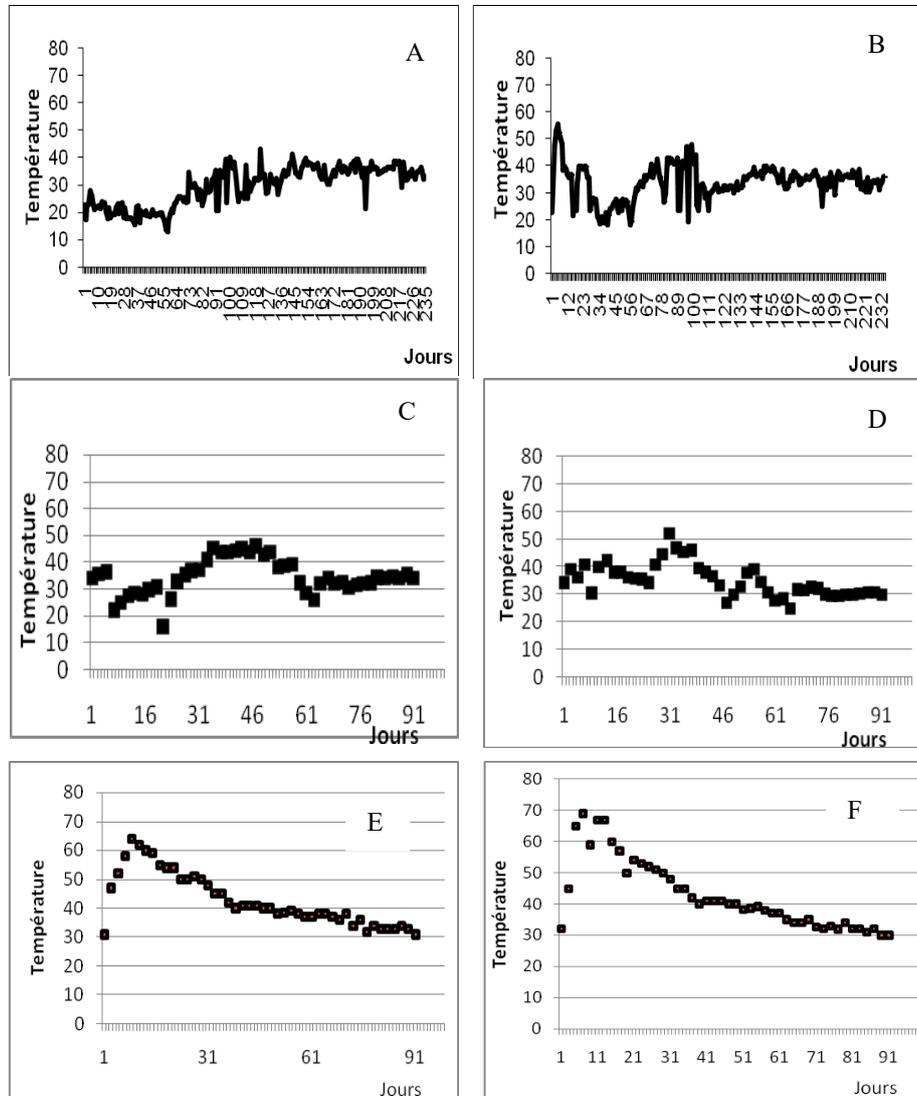


Figure 1. Evolution de la température durant le compostage des différents déchets

DP (déchets de palmier dattier) (A) ; mélange DPCh (déchets palmier dattier-chiendent) (B) ; DCh (déchets chiendents seuls) (C) ; DChBp (déchets chiendents-boues des phosphates naturels) (D) ; DChFv (déchets chiendents-feuilles déchets Verts) (E) et DGOM (déchets grignons olives-margines) (F).

Durant la phase de refroidissement qui succède à la phase thermophile, les baisses graduelles de température sont liées à la diminution de la quantité de matières organiques facilement dégradables, ce qui provoque un ralentissement de l'activité microbienne (Mustin, 1987).

Enfin, la température baisse progressivement à des valeurs avoisinant la température ambiante généralement inférieures à 40 °C durant la phase de maturation. Pendant cette dernière phase, le processus d'humification prédomine, le taux des substances humiques s'améliore par polymérisation et condensation des substances libérées lors de la décomposition de la matière organique (Mustin, 1987). La dégradation lente des composés résistants comme la cellulose, la lignine et les tanins ne permet pas le maintien de la température élevée et entraîne une coloration brune foncée à noir du compost qui devient plus fin et homogène (Hsu et Lo, 1999). L'activité microbiologique est faible durant cette phase et le compost mûr servira de nutriments pour les végétaux.

Une légère augmentation du pH a été relevée de 6 à 7 ; 6,4 à 7,6 ; 7,23 à 8,4 et de 5,49 à 6,06 pour le DP, le mélange DPCh, le mélange DChFv et le mélange DGOm respectivement (tableau 2). Pour les déchets chiendents seuls ou associés à la boue des phosphates, le pH est resté légèrement alcalin sans subir de variation significative au cours du compostage. Au cours du compostage, le pH de la masse organique subit des variations. Au début du processus de dégradation, en principe une phase acidogène se produit résultant de la production d'acides organiques et du CO₂ par les bactéries acidogènes en diminuant le pH initial. Ensuite, ce dernier augmente pendant la phase d'alcalinisation avant de se stabiliser à la fin vers la neutralité selon la nature du substrat (Tiquia et Tam, 2000). Cette seconde phase correspond à l'hydrolyse bactérienne de l'azote avec la production de l'ammoniac (NH₃) associée à la dégradation des protéines et à la décomposition d'acides organiques (Haug, 1993 et Mustin, 1987). En outre, la plupart des bactéries intervenant lors du compostage ont un pH de croissance optimal qui varie entre 5 et 8 et qui peut atteindre 9 (Yu et Huang, 2009).

Le suivi de l'évolution du rapport C/N au niveau des mélanges DCh, DChFv, DChBp et DGOm montre une diminution rapide respectivement de 34 à 14, de 33 à 11, de 64 à 12 et de 32 à 19 au bout du troisième mois (tableau 1). Par contre le rapport C/N du Dp ou DPCh diminue lentement de 56 à 39 et de 55 à 33 respectivement au bout du sixième mois. La diminution rapide du C/N au troisième mois de compostage pourrait être expliquée par la réduction importante du carbone organique facilement métabolisable lié à la biodégradation de la matière organique, essentiellement dans le cas des déchets de chiendents, des feuilles de déchets verts et des grignons d'olives. Ceux du palmier sont dégradés à une vitesse lente en raison de leur nature ligno-cellulosique. Un compost dont le rapport C/N est inférieur à 20 est considéré comme mature et peut être utilisé sans aucune restriction (Jimenez et Garcia, 1989). Un rapport C/N proche de 10-15 est souvent considéré comme indice de la formation du matériel humique et améliore la stabilité des déchets organiques traités (Lim *et al.*, 2014). De ce fait, selon les valeurs du rapport C/N, le DP et le mélange DPCh nécessiterait plus de temps de compostage dans ces conditions afin d'atteindre un bon niveau de stabilité. Ces mêmes composts Dp et DPCh sont riches

en matière organique difficilement biodégradable qui se dégrade graduellement pendant la phase de maturation (Solano *et al.*, 2001).

Les taux de cendres varient d'un compost à un autre, leur augmentation est due à la minéralisation des matières organiques de départ et à la concentration des éléments minéraux (NH_4^+ , NO_3 , P...) dans les composts produits. Ces augmentations sont plus élevées dans le cas du DP et DPCh que pour les autres mélanges utilisés (DCh, DChFv et DGOm). Les valeurs de cet élément sont restées plus importantes dans le cas du compost issu des DChBp que dans le cas du compost DCh seuls. L'évolution du taux de la matière organique est considérée aussi comme un bon critère de maturité du compost (Som, 2006). Il diminue de manière significative lors du compostage avec une perte de la matière organique qui peut atteindre 35 à 50 % (Abouelwafa, 2009).

Tableau 2. Paramètres physico-chimiques au cours du compostage

Stade de compostage	pH	COT (%)	NTK (%)	C/N Ratio	Cendres (%)	NH_4^+ (mg/g)	NO_3^- (mg/g)	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3$
Dpi	6,0	49,3	1,20	56,5	15,2	724	0,16	$4,52 \cdot 10^3$
DP6	7,0	40,8	1,06	38,6	29,8	738	0,70	$1,05 \cdot 10^3$
DChi	8,013	58,071	1,680	34,56	40	$0,066 \cdot 10^{-3}$	$0,046 \cdot 10^{-3}$	1,45
DCh3	7,863	30,654	2,190	14	49	$0,031 \cdot 10^{-3}$	$0,069 \cdot 10^{-3}$	0,44
DPChi	6,4	50,0	0,90	55,3	13,8	555	0,36	$1,51 \cdot 10^3$
DPCh6	7,6	34,8	1,07	32,6	40,0	770	4,00	$0,19 \cdot 10^3$
DChFvi	7,23	41,6	1,25	33,28	19	11,13	2,07	5,38
DChFv3	8,4	18,4	1,6	11,20	31,54	5,75	5,96	0,96
DChBpi	7,863	25,00	0,392	63,77	50	$0,013 \cdot 10^{-3}$	$0,018 \cdot 10^{-3}$	0,68
DChBp3	7,77	7,637	0,616	12,39	82	$0,0036 \cdot 10^{-3}$	$0,032 \cdot 10^{-3}$	0,11
DGOmi	5,49	50,50	1,57	32,16	3,9	5,44	1,89	2,88
DGOm3	6,06	37,30	1,98	18,84	5,6	2,82	7,6	0,37

DP: palmier dattier, DCh : chiendent, DPCh: palmier dattier-chiendent, DChFv : chiendent-feuilles, DChBp : chiendent-boue phosphate et DGOm : Grignon olive-margines ; i : initial, 3 mois et 6 mois.

Le suivi de l'azote ammoniacal N-NH_4^+ et de l'azote nitrique N-NO_3^- montre une augmentation simultanée de ces deux formes d'azote tout au long du processus pour les deux mélanges Dp et DPch avec des valeurs importantes de NH_4^+ , ce qui a abouti à des rapports $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3$ très élevés même après 6 mois de compostage. Par contre, pour les mélanges DChi, DChFv, DChBp et DGOm, une diminution du rapport $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3$ a été relevée (< 1) après seulement 3 mois de compostage. Le

rapport $N-NH_4^+/N-NO_3^-$ est aussi utilisé comme indicateur de maturité. Une diminution de ce rapport indique une quantité de nitrate importante et que le compost est mature (Raviv *et al.*, 2005). Un rapport $NH_4^+/NO_3^- \leq 1$ indique une importante oxydation de la matière organique, une dégradation significative du substrat et une maturité du compost (Barje *et al.*, 2012).

3.2. Détermination de la valeur agronomique des composts produits

3.2.1. Effet du compost DGOM sur la croissance du palmier

Nous avons relevé le rôle des composts à base de déchets d'huileries d'olive et des effluents liquides (DGOM) dans l'amélioration de la croissance et du développement du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*). Après 7 mois de culture, les palmiers traités au compost DGOM ont montré une production de biomasse plus élevée que celle du témoin (figure 2). Les doses 45 % et 100 % du compost ont doublé la production de matière sèche totale par rapport aux plants témoins. L'incorporation du compost DGOM au substrat de culture a entraîné l'augmentation de la teneur foliaire en N, P, K, Ca, Mg et Na (tableau 3). Ceci est en relation avec l'augmentation de l'assimilation minérale.

Tableau 3. Effet du DGOM sur les teneurs en éléments minéraux de la partie aérienne du palmier dattier, après 7 mois de culture

Doses DGOM	15 %	45 %	100 %	0 %
N (mg/g MS)	0,86 ± 0,10b	1,06 ± 0,29ab	1,26 ± 0,34ab	1,13 ± 0,19ab
P (µg/g MS)	0,23 ± 0,005e	0,51 ± 0,007b	0,60 ± 0,009a	0,35 ± 0,008d
K (µg/g MS)	5,20 ± 0,21cde	8,20 ± 0,77a	7,71 ± 0,51a	6,20 ± 0,65bc
Ca (µg/g MS)	2,61 ± 0,31b	2,59 ± 0,19b	2,57 ± 0,29b	4,93 ± 0,81a
Mg (µg/g MS)	0,70 ± 0,005b	0,88 ± 0,15ab	0,81 ± 0,006ab	1,30 ± 0,41a
Na (µg/g MS)	0,93 ± 0,1abcd	1,06 ± 0,05abc	0,72 ± 0,02d	1,15 ± 0,15ab

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes, $p < 0.05$

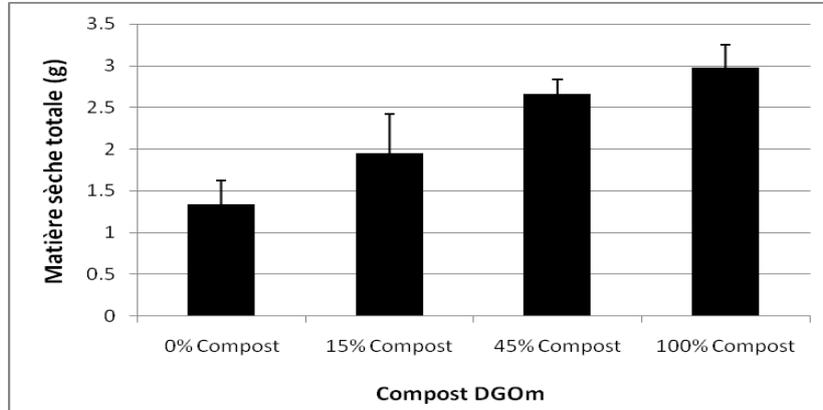


Figure 2. Effet du compost DGOM sur la production de matière sèche chez le palmier, après 7 mois d'inoculation

3.2.2. Effet du compost DPCh sur la biomasse végétale de l'orge

Les productions de la matière sèche aérienne (MSA) et racinaire (MSR) de l'orge en fonction des doses de compost issus des déchets de palmiers associés aux chiendents (DPCh) (figure 3 et photo 1) montrent une augmentation pour les deux doses D2 (1/3) et D3 (2/3), et plus marquées pour la dose D2. L'augmentation de la matière sèche aérienne et racinaire indique l'amélioration de la croissance végétale. L'effet négatif de la dose D4 est bien confirmé par la diminution de la MSA et MSR par rapport au témoin. Ceci est peut être dû à la forte concentration d'éléments minéraux, ce qui a induit une mauvaise assimilation de nutriments, et/ ou bien une immaturité du compost.

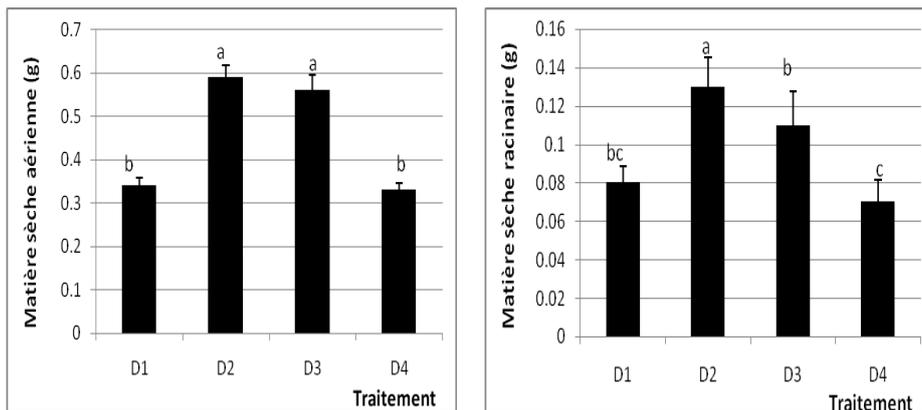


Figure 3. Effet du compost DPCh sur la biomasse végétale de l'orge

Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes, $p < 0.05$. (D1 : 0/3 compost, D2 : 1/3 compost, D3 : 2/3 compost et D4 : 3/3 compost).



Photo 1. Effet du compost DPCh sur la croissance des plants d'orge
(D1 : 0/3 compost, D2 : 1/3 compost, D3 : 2/3 compost et D4 : 3/3 compost)

3.2.3. Effet du compost DCh sur la biomasse de la luzerne

L'application du compost issu des chiendents (DCh) à 5 et à 20 % a un effet bénéfique sur l'amélioration de la production de matière sèche aérienne (MSA) et racinaire (MSR) de la luzerne par rapport au témoin (figure 4 et photo 2). Après deux mois d'application, la dose 20 % du DCh a permis des améliorations spectaculaires de la biomasse de la luzerne.

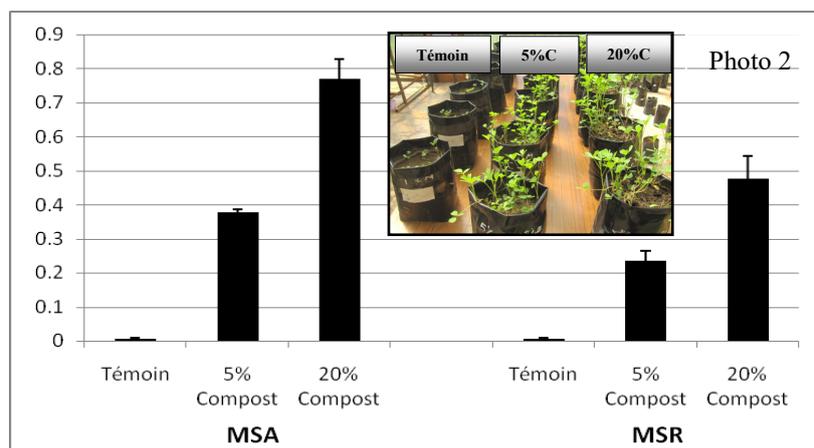


Figure 4. Effet du compost DCh sur la MSA et MSR de la luzerne après 2 mois de culture

3.2.4. Effet du compost DChBp sur la croissance du blé

En termes de production de matière sèche aérienne du blé (MSA), la dose du compost issue de boues de lavage et de chiendents (C2D1) (300 kg de boue/10 m³ de chiendents), appliquée à raison de 0,37 tonne/hectare s'est montrée la plus efficace (figure 5). Nous notons une augmentation nettement significative de la MSA de 8,50 fois plus (0,50g de MS) que celle des plantes témoins qui est de l'ordre de 0,059g de MS, après 2 mois de culture. Aussi, la MSA du blé est 5 fois plus élevée chez les plants amendés par les doses C2D2 et C3D2 du compost DChBp (2,5 T/ha). Des résultats similaires ont été relevés dans le cas du traitement du blé par 2,5 T/ha de boues compostées et de phosphogypse (S2D2).

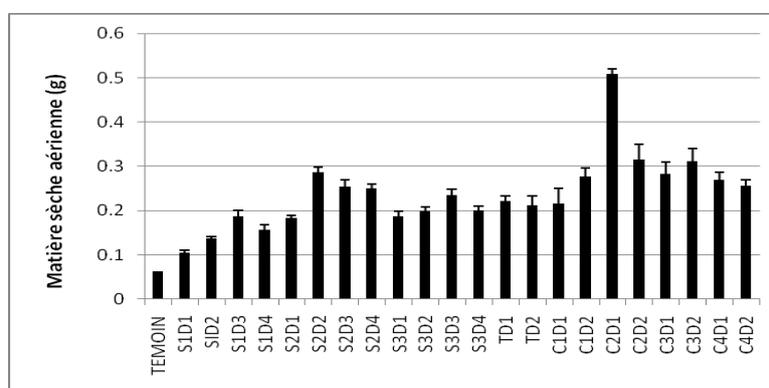


Figure 5. Effet du DChBp sur la croissance du blé après 2 mois de culture

T : Témoin sans aucun amendement ; S1D1 : 0,37 T phosphogypse/ha ; S1D2 : 2,5 T phosphogypse/ha ; S1D3 : 5T phosphogypse/ha ; S1D4 : 10T phosphogypse/ha ; S2D1 : 0,37T/ha de boues + 0,37 T/ha de phosphogypse) ; S2D2 : 2,5 T/ha de boues + 2,5 T/ha de phosphogypse ; S2D3 : 5 T/ha de boues + 5 T/ha de phosphogypse ; S2D4 : 10T/ha de boues + 10T/ha de phosphogypse ; S3D1 : 0,37T/ha de boues + 0,74 T/ha de phosphogypse ; S3D2 : 2,5 T/ha de boues + 5 T/ha de phosphogypse ; S3D3 : 5 T/ha de boues + 10 T/ha de phosphogypse ; S3D4 : 10T/ha de boues + 20 T/ha de phosphogypse ; TD1 : 0,37 T Compost chiendents seuls /ha ; TD2 : 2,5 T Compost chiendents seuls/ha ; C1D1 : 0,37 T/ha DChBp à 240 kg boues/10 m³ de chiendents ; C1D2 : 2,5 T/ha DChBp à 240 kg boues/10 m³ de chiendents ; C2D1 : 0,37 T/ha DChBp à 300 kg de boue/10 m³ de chiendents ; C2D2 : 2,5 T/ha DChBp à 300 kg boues/10 m³ de chiendents ; C3D1 : 0,37 T/ha DChBp à 1 540 kg de boue/10 m³ de chiendents ; C3D2 : 2,5 T/ha DChBp à 1 540 kg boues/10 m³ de chiendents ; C4D1 : 0,37 T/ha DChBp à 4 620kg de boue/10 m³ de chiendents ; C4D2 : 2,5 T/ha DChBp à 4 620 kg boues/10 m³ de chiendents.

Le choix des différents types de déchets à composter est justifié par leur abondance importante, leur richesse en P total ou en N total ou encore en matière

organique avec des rapports C/N favorables pour une bonne activité microbiologique et un bon déroulement du compostage.

L'augmentation de la température des déchets en cours de compostage est due au métabolisme aérobie des micro-organismes psychrophiles et mésophiles qui s'attaquent aux composés organiques simples et facilement métabolisables. Hachicha *et al.* (2009) ont signalé que lors du compostage une température qui dépasse 60 °C et maintenue pendant plusieurs jours assure la stabilisation de la matière organique et la suppression des micro-organismes pathogènes. Généralement, durant le processus de compostage les fluctuations de la température se déroulent en quatre phases, mésophile, thermophile, refroidissement et maturation. La diminution de température, pendant la phase de maturation, est due à l'épuisement de la matière organique facilement biodégradable (Petiot et Guardia, 2004). Cette évolution de la température pour le compost DP est liée à la nature lignocellulosique du substrat qui est peu fermentescible. Melillo *et al.* (1982) ont rapporté que la quantité de lignine et sa distribution dans les cellules peut affecter la décomposition par son action comme une barrière vers la décomposition des celluloses et des autres carbohydrates. Par conséquent, la dégradation de la cellulose et des hémicelluloses est plus lente pour les substrats de plantes ligno-cellulosiques (Huang *et al.*, 2010). De ce fait, le compost DP se dégradera plus lentement que les autres composts testés.

L'augmentation du pH peut être expliquée par une accumulation d'ammoniac et/ou une perte d'acides gras de courtes chaînes et de volatiles qui résultent de l'activité microbienne (Shak *et al.*, 2014).

Le rapport C/N est utilisé pour évaluer la maturité d'un compost. Les changements de ce rapport durant le compostage reflètent la décomposition et la stabilisation de la matière organique. Le rapport C/N diminue lors du processus de compostage pour se stabiliser vers la fin. Rynk (1992) a considéré un rapport C/N entre 8 et 15 comme caractéristique d'un compost mûr. Un rapport inférieur à 12 est généralement considéré comme un signe de maturité (Bernal *et al.*, 1998 et Som *et al.*, 2009). Toutefois une valeur de 20 peut aussi être le signe d'une maturité avancée (Koivula *et al.*, 2000). Ce rapport dépend de la composition des substrats à composter dont on distingue soit des substrats avec C/N élevé riche en carbone et résistant à la décomposition par les microorganismes (paille, produits lignocellulosiques), soit des substrats avec C/N faible qui sont riches en azote et très fermentescibles (déchets alimentaires, boues résiduelles...).

Les valeurs enregistrées de N-NH_4^+ après 6 mois de compostage pour les matériaux Dp et DPCh montrent que leur maturité n'est pas encore achevée. Zucconi et de Bertoldi (1987) ont suggéré une valeur de 400 mg kg⁻¹ de N-NH_4^+ comme le niveau maximal dans un compost mature. Néanmoins la biodégradation lente des substrats de palmiers peut être améliorée par l'ajout d'un autre substrat plus facilement biodégradable et/ou par un broyage plus fin du matériel de départ afin de réduire le temps de compostage.

Par ailleurs, le rôle des composts sur la croissance du palmier dattier, de l'orge, de la luzerne et du blé a été mis en évidence. Une amélioration de la croissance

végétale des plantes testées a été notée en fonction de la dose du compost appliquée. Les faibles doses appliquées de composts se sont montrées bénéfiques pour la biomasse des plantes. Un effet négatif par l'application de la dose 100 % de compost a été observé chez les plantes excepté dans le cas du palmier dattier traité au compost DGOM. Les faibles doses du compost DPCh (< à 30 %) sont nettement bénéfiques pour la croissance de l'orge.

Plusieurs travaux de recherche ont montré que l'application du compost améliore les différentes propriétés physico-chimiques et biologiques des sols (Toumpeli *et al.*, 2013 ; Killi et Kavdir, 2013 ; Mehta *et al.*, 2014). Akram Quasi *et al.* (2009) et Motta et Maggiore (2013) ont rapporté que l'application du compost issu des déchets solides municipaux ainsi que d'autres sources de carbone organique pour des fins agricoles mène à des changements positifs dans les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol et par conséquent l'augmentation du rendement des plantes. Roca-Pérez *et al.* (2009) ont rapporté que l'amélioration de la fertilité physique du sol due à l'apport de matière organique par ajout du compost améliore la structure du sol, sa porosité et sa capacité de rétention en eau.

Aussi, le compost peut apporter aux sols agricoles en plus de la matière organique, des éléments fertilisants majeurs (N, P, K), secondaires (Ca, Mg, Na, S...) et oligo-éléments essentiels (Fe, Cu, Co, Ni, Zn,...) nécessaires pour l'intensification de l'agriculture (El Ouaquodi, 2015). La teneur élevée de la matière organique des composts améliore l'activité biologique, enzymatique des substrats et la biodisponibilité des éléments nutritifs par minéralisation de la matière organique (Pascual *et al.*, 1999 ; Gustafsson *et al.*, 2000 ; Gregorich *et al.*, 2003 ; Hofman et Dušek, 2003).

4. Conclusion et perspectives

Les mélanges des déchets étudiés DGOM (Grignon olive-margines), DCh (chiendents) et DChBp (chiendents-boues des phosphates naturels) ont atteint leur maturité et leur stabilité après 3 mois de compostage avec un rapport C/N < à 19. Par contre, les substrats de palmier dattier DP et DPCh nécessitent plus de temps de compostage pour atteindre un bon niveau de stabilité.

L'utilisation des différents composts a favorisé nettement la croissance des palmiers dattiers et des cultures sous-jacentes testées. Une variation de cette croissance végétale des plantes a été notée en fonction de la dose du compost appliquée. L'application de forte dose 100 % entrave le développement des plantes. Les faibles doses de composts sont plus efficaces dans l'amélioration des paramètres de croissance des cultures testées.

L'utilisation de tels fertilisants organiques issus du bioprocédé aérobie pourraient constituer un moyen biotechnologique performant, réduisant les impacts des déchets générés en grande quantité d'une part et améliorant la croissance des plantes aux contraintes pédoclimatiques du milieu et qui vivent continuellement sous les stress salins, hydriques accrus et les attaques d'agents pathogènes, d'autre part.

Remerciements

Les auteurs remercient la Fondation Mohammed VI pour la protection de l'environnement à Rabat, la Wilaya de Marrakech-Safi et la Commune Urbaine de Marrakech, Maroc pour le soutien à ce projet et la mise à disposition des infrastructures et de la main d'œuvre nécessaires. Nos remerciements vont également au Laboratoire Ecologie et Environnement de la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech.

Bibliographie

- Abouelwafa R. (2009). *Biodégradation aérobie des boues de station d'épuration des rejets du raffinage des huiles brutes pour une valorisation agronomique*. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia Marrakech, Maroc.
- AFNOR. (1975). *Dosage de l'azote ammoniacal. NF-T 90-015*. Association Française de Normalisation.
- AFNOR. (1999). *Matières fertilisantes et supports de culture. Tome 1 : Normalisation*. Dans *Recueil normes et réglementation*. Association française de normalisation. Paris, p. 433-436.
- Ahn H.K., Sauer T.J., Richard T.L., Glanville T.D. (2009). Determination of thermal properties of composting bulking materials. *Bioresource Technology*, vol. 100, p. 3974-3981.
- Akram Quasi M., Akram M., Ahmad N., Artiola J.F., Tuller M. (2009). Economical and environmental implications of solid waste compost applications to agricultural fields in Punjab, Pakistan. *Waste Management*, vol. 29, p. 2437-2445.
- Aubert G. (1978). *Méthodes d'analyse des sols*. Edition CRDP, Marseille, France.
- Barje F., El Fels L., El Hajjouji H., Amir S., Winterton P. and Hafidi M. (2012). Molecular behaviour of humic acid-like substances during co-composting of olive mill waste and the organic part of municipal solid waste. *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 74, p. 17-23.
- Bernal M.P., Paredes C., Sanchez-Monedero M.A., Cegarra J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, vol. 63, p. 91-99.
- Clapp C.E., Chen Y., Hayes M.H.B., Cheng HH. (2001). Plant growth promoting activity of humic substances. *Understanding and Managing Organic Matter in Soils, Sediments and Waters*. Swift R. S. and Spark K. M. (Eds). p. 243-255.
- El Ouaquodi F.-Z. (2015). *Contribution à la valorisation des déchets de palmier dattier par compostage : Approche physico-chimique, analyse lipidique, caractérisation spectroscopique et thermique des acides humiques et valeur agronomique des composts*. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Maroc.
- 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 pertinent*. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique, Paris Grignon.

- Giusquiani P.L., Pagliai M., Gigliotti G., Businelli D., Benetti A. (1995). Urban waste composts: effects on physical, chemical and biochemical soil properties. *Environ. Qual.*, vol 24, p 175-182.
- Gregorich E.G., Beare M.H., Stoklas U., St-Georges P. (2003). Biodegradability of soluble organic matter in maize cropped soils. *Geoderma*, vol. 113, p. 237-252.
- Gustafsson J.P., Van Hees P., Starr M., Karlton E., Lundstrom U. (2000). Partitioning of base cations and sulphate between solid and dissolved phases in three podzolised forest soils. *Geoderma*, vol, 94, p. 311-333.
- Hachicha S., Sellami F., Cegarra J., Hachicha R., Drira N., Medhioub K., Ammar E. (2009). Biological activity during co-composting of sludge issued from the OMW evaporation ponds with poultry manure- Physico-chemical characterization of the processed organic matter. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 162, p. 402-409.
- Haug R.T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*. Boca Raton, Florida.
- Hofman J., Dušek L. (2003). Biochemical analysis of soil organic matter and microbial biomass composition a pilot study. *European Journal of Soil Biology*, vol. 39, p. 217-224.
- Hsu J.H., Lo S.L., 1999. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure. *Environmental Pollution*, vol. 104, p. 189-196.
- Huang D.L., Zeng G.M., Feng C.L., Hu S., Lai C., Zhao M.H., Su F.F., Tang L., Liu HL. (2010). Changes of microbial population structure related to lignin degradation during lignocellulosic waste composting. *Bioresource Technology*, vol. 101, p. 4062-4067.
- Jimenez I.E., Garcia P.V. (1989). Evaluation of city refuse compost maturity. *Review Biological Wastes*, vol. 27, p. 115-142.
- Killi D., Kavdir Y. (2013). Effects of olive solid waste and olive solid waste compost application on soil properties and growth of *Solanum lycopersicum*. *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 82, p. 157-165.
- Koivula N., Hänninen K., Tolvanen O. (2000). Windrow composting of source separated kitchen biowastes in Finland. *Waste Management and Research*, vol. 18, p. 160-173.
- Lim S.L., Wu T.Y., Clarke C. (2014). Treatment and biotransformation of highly polluted agro-industrial wastewater from a palm oil mill into vermicompost using earthworms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. vol. 62, n° 3, p. 691-698.
- Mallard P., Gabrielle B., Vial E., Rogeau M., Vignoles M., Sablayrolles C., Carrère M., Renou S., Pierre N., Muller O., Coppin Y. (2006). *Quantification des impacts environnementaux associés au traitement biologique et à l'utilisation agricole des produits organiques – bilan des connaissances*. Rapport final Contrat ademe GBD 03, ADEME, Anges, France.
- Mehta C.M., Palni U., Franke-Whittle I.H., Sharma A.k. (2014). Compost: Its role, mechanism and impact on reducing soil-borne plant diseases. *Waste Management*, vol. 34, p. 607-622.
- Melillo J.M., Aber J.D., Muratore J.F. (1982). Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, vol. 63, p. 621-626.

- Moral R., Moreno-Caselles J., Perrez-Murcia M.D., Perez-Espinosa A., Rufete B., Parades C. (2005). Characterization of organic matter pool in manure. *Bioresource Technology*, vol. 96, p. 153-158.
- Motta S.R., Maggiore T. (2013). Evaluation of nitrogen management in maize cultivation grows on soil amended with sewage sludge and urea. *European Journal of Agronomy*. vol. 45, p. 59-67.
- Mustin M. (1987). *Le compost. Gestion de la matière organique*. Editions François Dubusc, Paris, France.
- Nardi S., Concheri G., Dell'Agnola G. (1996). Biological activity of humus. In: Humic Substances in Terrestrial Ecosystems (Eds, A. Piccolo), Elsevier, Science B. V., Amsterdam, p. 361-406.
- Nyembo K.L., Useni S.Y., Chinawej M.M.D., Kyabuntu I.D., Kaboza Y., Mpundu M.M. et Baboy L.L. (2014). Amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol sous l'apport combiné des biodéchets et des engrais minéraux et influence sur le comportement du maïs (Zeamays L. variété Unilu). *Journal Applied Biosciences*, vol. 74, p. 6121-6130.
- Oueslati M.A., Ksontini M., Haddad M., Charbonnel Y. (1995). Compostage des branches d'Acacia cyanophylla et des boues fraîches des stations d'épuration d'eaux usées. *Revue Forestière Française. XLVII*, vol. 5, p. 523-529.
- Pascual J.A., Garcia C., Hernandez T. (1999). Comparison of fresh and composted organic waste in their efficacy for the improvement of arid soil quality. *BioresourceTechnology*, vol. 68, p. 255-264.
- Petiot C., Guardia A. (2004). Composting in a laboratory reactor : a review. *Compost Science and Utilization*, vol. 12, p. 69-79.
- Rauthan B., Schnitzer M. (1981). Effects of soil fulvic acid on the growth and nutrient content of cucumber (*Cucumis sativus*) plants. *Plant Soil*, vol. 63, p. 491-495.
- Raviv M., Oka Y., Katan J., Hadar Y., Yogevev A., Medina S., Krasnovsky A., Ziadna H. (2005). High-nitrogen compost as a medium for organic container-grown crops. *Bioresource Technology*, vol. 96, p. 419-427.
- Roca-Pérez L., Martinez C., Marcilla P., Boluda R. (2009). Composting rice straw with sewage sludge and compost effects on soil-plant system. *Chemosphere*, vol. 75, p. 781-787.
- Rodier J. (1984). *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. 7^e édition. Dunod, Paris.
- Ruggieri L., Cadena E., Martinez-Blanco J., Gasol C. M., Rieradevall J., Gabarrell X., Gea T., Sort X., Sanchez A. (2009). Recovery of organic wastes in the Spanish wine industry. Technical, economic and environmental analyses of the composting process. *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, p. 830-838.
- Rynk R. (1992). *On farm composting Handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering service, NRAES-54 Ithaca, N.Y : Cooperative extension 186.
- Schnitzer M., Poapst P.A. (1967). Effects of a soil humic compound on root initiation. *Nature*. vol. 213, p. 598-599.

- Seul B.L., Chang H.L., Ki Yuol J., Park K.D., Dokyoung L., Pil J.K. (2009). Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy. *Soil and Tillage Research*, vol. 104, p 227-232.
- Shak K.P.Y., Wu T.Y., Lim S.L., Lee C.A. (2014). Sustainable reuse of rice residues as feedstocks in vermicomposting for organic fertilizer production. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 21, n° 2, p. 1349-1359.
- Solano M.L., Iriate F., Ciria P., Negro M.J. (2001). Performance characteristics of three aeration systems in the composting of sheep manure and straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 79, p. 317-329.
- Som M.P., Lemée L., Amblès A. (2009). Stability and maturity of a green waste and biowaste compost assessed on the basis of a molecular study using spectroscopy, thermal analysis, thermodesorption and thermochemolysis. *Bioresource Technologie*, vol. 100, p. 4404-4416.
- Som M.P. (2006). *Étude moléculaire des composés organiques de compost : formation, transformation dans les sols, action sur les propriétés des sols*. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France.
- Stevenson F.J. (1994). *Humus chemistry: Genesis, Composition, Reactions*, 2nd Edition. Wiley-Interscience, New York.
- Takeda M., Nakamoto T., Miyazawa K., Murayama T., Okad H. (2009). Phosphorus availability and soil biological activity in an Andosol under compost application and winter cover cropping. *Applied Soil Ecology*, vol. 42, p. 86-95.
- Tejada M., García-Martínez A.M., Parrado J. (2009). Effects of a vermicompost composted with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. *Catena*, vol. 77, p. 238-247.
- Tiquia S.M., Tam N.F.Y. (2000). Co-composting of spent pig litter and sludge with forced-aeration. *Bioresource Technologie*, vol. 72, p. 1-7.
- Toumpeli A., Pavlatou-Ve A.K., Kostopoulou S.K., Mamlos A.P., Siomos A.S., Kalburtji K.L. (2013). Composting phragmites australis Cav. Plant material and compost effects on soil and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) growth. *Journal of Environmental Management*, vol. 128, p. 243-251.
- Viel M. (1989). *Contrôle et valorisation de la thermogenèse microbienne au cours de la biodégradation aérobie de déchets agro-industriels et urbains à teneurs variables en graisses*. Thèse de l'Université de Toulouse, France. 166 p.
- Yu H., Huang G.H. (2009). Effects of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste. *Bioresource Technologie*, vol. 100, p. 2005-2011.
- Zhang L., Sun X. (2016). Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste. *Waste Management*, vol. 48, p. 115-126.
- Zucconi F., De-Bertoldi M. (1987). Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. In *de Bertoldi M et al (eds) Compost: production, quality and use*. London, Elsevier Applied Science, p. 30-50.

