



EVALUATION DE LA MATURITE ET DE LA QUALITE CHIMIQUE DES SUBSTRATS DE CROISSANCE À BASE DE METHACOMPOST AVICOLE POUR UNE MEILLEURE EXPLOITATION

M'SADAK Y., BEN M'BAREK A.

Département du Génie des Systèmes Horticoles et du Milieu Naturel. Université de
Sousse. Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem, BP 47,4042 Chott Mariem,
Tunisie

msadak.youssef@yahoo.fr

RESUME

Une évaluation directe a été consacrée à un ensemble de substrats de culture à base de mélange tourbe et méthacompost avicole affiné (MCA) avec ou sans l'ajout du compost sylvicole brut (CSB). Après la mise en œuvre des tests de maturité, les substrats de culture considérés ont subi des analyses chimiques (pH, conductivité électrique, salinité, matière organique, carbone organique total, azote total, rapport C/N, teneurs en éléments minéraux).

Les substrats mis à l'essai ont dévoilé une maturité relativement insuffisante, un pH acide et une salinité dans l'ensemble faible. Le MCA s'est avéré très riche en azote et riche en d'autres éléments minéraux (K,...). De telles caractéristiques révèlent que son incorporation avec la tourbe à raison de 10 à 20% pourrait être concevable en prenant les précautions nécessaires.

Mots clés : Pépinière moderne, substrat de croissance, tourbe, mélange avec méthacompost avicole, maturité, comportement chimique.

ABSTRACT

A direct assessment was devoted to a set of culture substrates based in mixing of peat and methacompost poultry refined (MCA) with or without the addition of forestry raw compost (CSB). After the implementation of the tests of maturity, growing substrates considered have underwent chemical analysis (pH,

© 2015 M'Sadak et Ben M'Barek. Ceci est un article Libre Accès distribué sous les termes de la licence Creative Commons Attribution (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui permet l'utilisation sans restriction, la distribution et la reproduction sur tout support, à condition que le travail original soit correctement cité.

electrical conductivity, salinity, organic matter, total organic carbon, total nitrogen, C/N, mineral contents).

The Substrates tested have unveiled a relatively immaturity, an acid pH and salinity generally low. The MCA has been very rich in nitrogen and rich in other minerals (K...). Such characteristics indicate that incorporation with peat in a proportion of 10-20% could be conceivable by taking the necessary precautions.

Keywords: Modern nursery, growth substrate, peat, mixing along with poultry methacompost, maturity, chemical behavior.

INTRODUCTION

La tourbe constitue le substrat de référence pour la croissance des plants en pépinière maraîchère moderne. Néanmoins, cette matière ne cesse de poser des problèmes en matière d'approvisionnement et d'hémorragie de devises (M'Sadak et al., 2013a). En général, les déchets organiques, après compostage, peuvent être utilisés comme substrat de croissance pour remplacer la tourbe (Simins et Manios, 1990 ; García-Gómez et al., 2002 ; Benito et al., 2005).

Les pépinières hors sol récemment installées s'orientent de plus en plus vers le remplacement de la tourbe par les produits issus des traitements biologiques de la biomasse animale (compost ou méthacompost selon le procédé appliqué : aérobie ou anaérobie) et/ou végétale (compost sylvicole).

La biométhanisation ou digestion anaérobie, ayant comme principale vocation la production de biogaz, a dévoilé ces derniers temps abondamment d'intérêts et elle constitue, aujourd'hui, une source de diversification pour le monde agricole. Le conditionnement du digestat, Co-produit secondaire de la biométhanisation, permet l'obtention d'un digestat solide, appelé méthacompost et d'un digestat liquide appelé couramment jus de process (M'Sadak et al., 2010 ; M'Sadak et al., 2011). Le recours au digestat, particulièrement le méthacompost avicole (MCA), qui est la fraction solide du digestat issu de la biométhanisation des fientes avicoles, comme substitut partiel du compost sylvicole pourrait constituer une option intéressante pour la production des plants forestiers (M'Sadak et al., 2012a ; M'Sadak et al., 2013c).

En pépinière, les propriétés physiques du substrat de culture comptent parmi les facteurs déterminants de la qualité biologique des plants (André 1987 ; Gras 1987 ; M'Sadak et al., 2012b ; M'Sadak et al., 2013b) et vu l'impossibilité de leur modification après installation des jeunes plants, ces caractéristiques s'avèrent plus importantes que les propriétés chimiques (Landis, 1990 cité par Ammari et al., 2006).

Dans cette optique, M'Sadak et al. (2012a) ont entrepris un travail expérimental qui s'est intéressé à une tentative d'optimisation physico-chimique du compost sylvicole brut (CSB), produit au niveau de la pépinière forestière moderne de

Chott-Mariem (Sousse, Tunisie), en ayant recours à l'incorporation du méthacompost avicole affiné (MCA) à la sortie du digesteur (MCAdig) ou à la sortie du décanteur (MCAdéc), en vue de mettre au point un substrat adéquat pour l'élevage en conteneurs des plants forestiers. Il ressort les résultats essentiels suivants :

- L'incorporation des MCA considérés s'est avérée physiquement positive dans des proportions bien précises et cette orientation contribue à un bon équilibre entre les porosités d'aération et de rétention.

- De point de vue chimique, l'utilisation du CSB en mélange avec du MCA s'est avérée très encourageante en termes de richesse initiale en éléments minéraux du mélange. Cette richesse initiale est due à l'intégration du MCA dans la confection des substrats de culture.

- Il n'y a pas de différences significatives entre le MCAdig et le MCAdéc de point de vue physique. Sur le plan composition chimique, le MCAdéc a dévoilé une légère supériorité en éléments minéraux (NPK, ...).

De même, M'Sadak et al. (2013a) ont tenté d'optimiser chimiquement le compost sylvicole en question, en ayant recours à des essais de criblage vibrant selon différentes techniques et à des mélanges à base du compost sylvicole considéré et du compost cunicole affiné selon différentes proportions. Les résultats obtenus ont révélé des variations des paramètres chimiques (pH, conductivité électrique, salinité, matière organique, carbone organique total, azote total, rapport C/N, teneurs en potassium et phosphore) selon le type du criblage (simple ou double) et la nature (composantes et ratio) du mélange considéré. Même si des différences significatives ont été observées, les valeurs enregistrées sont dans les normes d'acceptation, sauf pour les teneurs en phosphore et en potassium, où il fallait optimiser l'incorporation du compost cunicole pour ajuster la teneur du compost du broyat d'Acacia en ces éléments minéraux. Dans l'ensemble, le comportement chimique de différents substrats testés a été influencé par la nature et la granulométrie du substrat utilisé ainsi que par la nature du mélange élaboré.

Dans le même cadre, la présente étude se propose de déterminer certains critères de qualité chimique de quelques substrats confectionnés ; à base de tourbe en mélange avec MCA avec ou sans l'ajout de CSB ; s'avérant utiles pour une meilleure exploitation agronomique en pépinière maraîchère. Il s'agit d'une substitution partielle de la tourbe importée (substrat de référence) par le MCA et/ou le CSB, produits localement. Par ailleurs, cette investigation a débuté par l'étude de la phytotoxicité éventuelle du méthacompost avicole et de divers mélanges confectionnés, ainsi que du substrat de référence (tourbe), sur trois plantes-tests (laitue, maïs et tomate). Deux types de tests de phytotoxicité (ou tests de maturité) ont été accomplis, à savoir un test biologique rapide ou biotest de germination sur laitue, maïs et tomate et un test de croissance plus étendu (plus que 6 semaines) des jeunes plants de tomate installés sur les divers substrats élaborés. Auparavant, les substrats en question ont été soumis à une

caractérisation physico-hydrigue ayant fait l'objet d'une publication antérieure (M'Sadak & Ben M'Barek, 2014).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Substrats mis à l'essai

Dans l'ensemble, neuf substrats de culture à base de mélange à partir de deux ou de trois substrats purs selon le cas (Tableau 1) ont été testés de point de vue maturité par rapport à un Témoin (Sable) et au substrat de référence (Tourbe) et analysés à propos de leurs propriétés chimiques essentielles. Le comportement chimique de la Tourbe et de son substitut principal mis à l'essai (Méthacompost avicole) a été également examiné, d'où, la caractérisation chimique mise en œuvre a touché onze substrats au total.

Substrats purs

- Tourbe brune

On distingue différents types de tourbes caractérisées par leurs diverses origines et compositions botaniques (Zuhang et al., 1984), par le degré de décomposition et la granulométrie (Michel, sd). La tourbe utilisée lors de cette étude est de la tourbe brune de type KLASMANN.

- Compost sylvicole brut

Le compost utilisé lors de cette investigation est du CSB, produit sur la plateforme de compostage rattachée à la pépinière forestière moderne de Chott Mariem (région de Sousse), à partir de la mise en fermentation aérobie du rebroyat des branches fraîches d'Acacia cyanophylla, obtenu à partir d'un double broyage séparé à couteaux et à marteaux à l'aide de deux broyeurs simples distincts.

- Méthacompost avicole affiné

Le MCA (sous-produit solide), objet capital de cette étude, est issu de la biométhanisation industrielle de la biomasse avicole. Le digesteur industriel, produisant ce résidu, fait partie d'un projet pilote de production de biogaz localisé à Hammam Sousse (région de Sousse). Ce projet a été réalisé en 2000 dans le cadre de la nouvelle stratégie adoptée par l'Agence Nationale des

Énergies Renouvelables (ANER) qui vise le développement des systèmes industriels de biogaz. Selon ALCOR et AXENNE (2003) et M'Sadak et al. (2012a). Il s'agit d'un digesteur d'une capacité de 300 m³, entretenu en continu quotidiennement par 10 m³ de substrat composé d'environ de 2/3 d'eau et 1/3 de fientes avicoles.

Substrats à base de mélange

À partir de trois substrats purs cités précédemment, on a conçu neuf mélanges, tout en substituant partiellement la tourbe par le MCA et/ou par le CSB (% volume). On a utilisé différentes combinaisons de Tourbe, du MCA et avec ou sans CSB pour discerner si le MCA pourrait réellement être un substitut de la Tourbe. Les mélanges testés sont répartis en deux séries (de SB à SE et de SA' à SE') présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Identification et composition de mélanges confectionnés

Mélanges T + MCA			Mélanges T + MCA + CSB			
Substrats	% T	% MCA	Substrats	% T	% MCA	% CSB
SA	100	00	SA'	80	10	10
SB	90	10	SB'	70	20	10
SC	80	20	SC'	60	20	20
SD	75	25	SD'	50	20	30
SE	70	30	SE'	50	30	20

Appréciation de la maturité des substrats

Le biotest de germination consiste à faire germer des espèces végétales, notamment des légumineuses qui sont sensibles aux substances phénoliques libérées par le compost pur (Ammari et al., 2006). Dans la pratique, on réalise, dans des petits pots de végétation, des tests simples et rapides de germination des plantes à cycle végétatif relativement court (Albuquerque et al., 2006). On peut citer les tests de laitue, de maïs (Juste et al., 1985) et de tomate (Berberis et Nappi, 1996) en 28 jours. Les graines sont semées, au nombre de 20 graines dans chaque pot (Juste et al., 1985), sur le substrat humidifié en bocal hermétiquement fermé.

La maturité des substrats est évaluée, après sept jours, à partir de la détermination du pourcentage de germination. Le biotest de détection de la phytotoxicité permet de prévoir l'existence éventuelle de quelques éléments phytotoxiques.

Evaluation de principales propriétés chimiques

Trois échantillons de chaque substrat ont été prélevés et leur analyse a aidé pour la détermination de différents paramètres chimiques des substrats.

Les analyses du pH et de CE ont été réalisées au laboratoire de Chimie relevant de l'Institut Supérieur Agronomique de Chott-Mariem. Les autres analyses chimiques ont été effectuées à l'Institut de l'Olivier de Sousse (Laboratoire des Systèmes de Productions Oléicoles et Fruitières).

pH

Le pH est mesuré selon la norme internationale ISO 10390 (1994). La lecture du pH est accomplie au moyen d'un pH-mètre, modèle « HANNA Instruments 8519 ».

Conductivité Électrique et Salinité

La Conductivité Électrique (CE) est la mesure de la concentration des ions solubles du compost (Tiquia, 2010). La salinité est reliée à la quantité totale d'ions minéraux en solution (principalement les engrais) et d'autres minéraux contenus dans le substrat et l'eau d'irrigation. Elle est déterminée à partir de la formule suivante :

$$S (g / l) = 0,7 \times CE (mmhos / cm^3)$$

La CE est exprimée en (mmhos/cm³ ou mS/cm). La norme internationale ISO 11265 (1994) prescrit une méthode de sa mesure. La CE spécifique de l'extrait filtré est mesurée à l'aide d'un conductimètre, modèle « Metter Toledo, Seven Easy ».

Matière Organique et Carbone Organique

La détermination de la MO et des cendres est effectuée suivant la Norme Tunisienne (NT) relative au dosage de la MO du fumier.

La teneur en MO est exprimée selon l'équation suivante :

$$MO (\%) = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) \times 100$$

Avec : P1 : Poids avant calcination (mg) ; P2 : Poids après calcination (mg).

À partir de la MO, une déduction de la teneur en carbone sera possible tout en appliquant selon le cas l'une des relations suivantes :

$$MO (\%) = 1,4 \times C (\%) + 1,5 \quad (\text{NT})$$

$$MO (\%) = 1,725 \times C (\%) \quad (\text{NF})$$

$$MO (\%) = 2 \times C (\%) \quad (\text{NB})$$

La norme NT est celle retenue lors de cette étude. À cet égard, la teneur en carbone organique (% Corg) est alors déduite à partir de l'équation relative à la NT donnée ci-après :

$$C_{org} = \frac{MO (\%) - 1,5}{1,4}$$

Azote

L'azote est dosé par la méthode de Kjeldhal (Bremner et Mulvaney, 1982 cité par Goyal et al., 2005) dont le principe repose sur l'attaque de l'extrait par l'acide sulfurique concentré (H₂SO₄). L'azote organique se transforme en azote ammoniacal. Le dosage d'azote est effectué d'une façon automatisée. Les teneurs en azote relatives à chaque substrat sont affichées directement dans une fiche de mesure sur ordinateur branché au distillateur.

Dosage de certains éléments minéraux

Le dosage des éléments chimiques a touché le potassium (K), le calcium (Ca) et le sodium (Na) à l'aide d'un photomètre à flamme. Il nécessite une minéralisation et une préparation des solutions d'étalonnage. La minéralisation étant une étape commune, seule la nature de la solution d'étalonnage change. Le calcul du % de chaque élément (% MM) se fait comme suit :

$$K, Ca, Na (\%) = \frac{n \times D \times V}{10^4}$$

Avec : n : Valeur trouvée (µg/ml) ; D : Dilution de la solution à photomètre (D = 1) ; V : Volume de la solution (V = 100 ml) ; p : Prise d'essai (g).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Maturité des substrats

Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation de la maturité du compost (Goyal et al., 2005 ; Albuquerque et al., 2006). Les essais standards utilisés dans la recherche de la qualité des plantes-tests peuvent être divisés en quatre larges catégories : Essai de germination, essai de croissance, combinaisons de

germination et de croissance, et d'autres méthodes biologiques telles que les activités enzymatiques (Bernal et al., 2009).

La méthode biologique permet d'apprécier le caractère phytotoxique des matériaux organiques intégrés avec la tourbe, dans la confection des divers substrats, en observant le comportement de trois plantes-tests (laitue, maïs et tomate) cultivés sur les substrats considérés. Après 7 jours de semis, on a entrepris le comptage des graines germées dans les différents récipients remplis par les divers substrats mis à l'essai. Ce comptage a été poursuivi biquotidiennement pendant trois semaines. Les moyennes relevées sont résumées dans le tableau 2 ci-après.

Le pourcentage de germination des semences, sur différents substrats testés, varie fortement selon l'espèce et la composition de chaque substrat. Le taux de germination sur le Témoin (sable) est de 95%, ce qui permet de déduire qu'il s'agit des graines ayant une bonne faculté germinative. Seuls les pourcentages de germination des graines de tomate sont toujours supérieurs à 50%, pourcentage de germination garanti par l'utilisateur du compost (Tiquia, 2003). Pour le reste des résultats relatifs aux autres plantes-tests, ils ne répondent pas aux normes et ils sont très éloignés des valeurs données par Tiquia (2003) dans la plupart des cas.

Les méthodes biologiques sont généralement basées sur le fait que les composts immatures ont la propriété d'inhiber la germination et la croissance des végétaux (Vanai, 1995).

L'évaluation directe de la capacité germinative des graines de laitue sur méthacompost bovin (MCB) (M'Sadak et al., 2013d) a donné pleine satisfaction, puisque le taux de germination est même plus élevé que celui obtenu sur sable considéré comme témoin (95% contre 82%), ce qui prouve une maturité convenable de ce matériau. Ce MCB pourrait servir comme substrat de culture. Le MCA, objet de cette étude, au contraire, donne des résultats très éloignés de ceux obtenus pour le cas du MCB. Il montre, en effet, des problèmes de phytotoxicité.

Tableau 2 : Résultats relevés des tests de maturité

Substrats	Composition (%)	Taux de germination des semences (%)		
		Laitue	Maïs	Tomate
Témoin	-	95,00	-	-
SA	100% T + 00% MCA	74,00	75,00	97,50
SB	90% T + 10% MCA	35,00	40,00	87,50
SC	80% T + 20% MCA	20,00	40,00	87,50
SD	75% T + 25% MCA	15,00	25,00	55,00
SE	70% T + 30% MCA	10,00	15,00	57,50
SA'	80% T + 10% MCA + 10% CSB	15,00	65,00	77,50
SB'	70% T + 20% MCA + 10% CSB	10,00	40,00	55,00
SC'	60% T + 20% MCA + 20% CSB	11,00	65,00	77,50
SD'	50% T + 20% MCA + 30% CSB	7,00	60,00	80,00
SE'	50% T + 30% MCA + 20% CSB	5,00	15,00	52,50

Selon Lemaire et al. (1989), il faut au préalable distinguer deux sortes de phytotoxicité : une phytotoxicité originelle et une phytotoxicité acquise. Le méthacompost que ce soit bovin ou avicole comporte donc ses propres critères agronomiques. La qualité finale du produit digéré dépend ainsi des caractéristiques du produit d'origine.

Les biotests de germination reposent sur les propriétés des composts immatures qui inhibent la croissance des végétaux par diverses substances phytotoxiques comme les acides phénoliques et les AGV. La phytotoxicité peut provenir aussi des acides organiques, tels que l'acide propionique, l'acide acétique, plusieurs acides benzoïques et phénylacétiques (Mustin, 1987).

Les effets phytotoxiques peuvent être observés à différents stades de la culture : à la levée, au cours du développement. De plus, ils peuvent être temporaires ou permanents. Selon Juste et al. (1985), les symptômes de phytotoxicité peuvent affecter la plante entière ou seulement une partie. Elle peut être à l'origine du retard de croissance et/ou de développement. Les manifestations de la phytotoxicité du MCA regroupent, par la suite, l'inhibition de la germination, le retard à la levée ou le retard de la croissance. De ce fait, l'emploi du MCA a un effet négatif très considérable sur la germination des graines de laitue et de maïs et un effet moins important sur des graines de tomate.

Les résultats obtenus peuvent être expliqués par la présence probable comme c'est déjà mentionné précédemment de substances inhibitrices de la germination au niveau des matériaux employés (MCA et CSB) qui n'ont pas atténué le stade

final de maturité. En effet, la phytotoxicité d'un compost donné diminue avec la maturité de ce dernier (Kerkeni, 2008).

D'après Zucconi et De Bertoldi (1987) cité par Bernal et al. (2009), les essais de germination fournissent une image instantanée de phytotoxicité, alors qu'ils ne sont pas suffisants pour une meilleure évaluation de la phytotoxicité. Il faut avoir recours aux essais de croissance qui seront affectés en continuant des changements de la stabilité ou de la maturité des composts examinés et de divers autres paramètres indiquant le degré de maturité des substrats.

Il est indispensable de tenir compte des conditions de stockage du MCA avant son emploi. Le substrat utilisé lors de cette étude est soumis aux fluctuations atmosphériques, en plus, il n'a pas fait l'objet d'aucun post-traitement ni de stockage dans un local bien conservé. Il n'est pas raisonnable donc de considérer le compostage comme un simple pré-traitement, il s'agit bien d'une étape de profonde modification de la matrice organique (APESA, 2007). Le compost immature pose des problèmes de stockage dus à des dégagements gazeux ou malodorants, et des problèmes de phytotoxicité ou de pollution après son épandage au sol (Veenken et al., 2000 ; Tiquia, 2002 ; Goyal et al., 2005 ; Bernal et al., 2009).

Comportement chimique des substrats

pH, Conductivité Électrique et Salinité

Selon Bernal et al. (2009), il existe d'autres critères de qualité indépendamment de la maturité déterminant la qualité d'un compost, tels que le pH et les sels solubles qui devraient être également pris en considération pour définir l'utilisation des composts.

Le substrat a pour rôle de maintenir un environnement propice pour la germination et la croissance des jeunes plantules. Il doit répondre à certains critères tels que une qualité physico-chimique favorable à retenir les engrais et à les restituer (Zuhang et al., 1984). Selon Letard et al. (1995), il est nécessaire d'avoir une connaissance sur la réactivité chimique des substrats afin de garder la maîtrise de l'apport nutritionnel.

D'après Lamhamedi et al. (1997), les supports de culture hors sol devraient être théoriquement inertes, au moment de la fertigation, les solutions nutritives apportent tous les éléments minéraux. La tourbe est largement employée en pépinière comme composant principal des substrats de culture grâce à ses bonnes caractéristiques physico-chimiques (Leclerc, 2001).

L'importance du pH réside dans le fait qu'il affecte la solubilité des éléments nutritifs dans le sol et dans la solution du sol. Cependant, en culture en conteneurs, puisque les éléments nutritifs sont fournis régulièrement, le pH du substrat est moins important (Comtois et Légaré, 2004). Si, dans les conditions naturelles, le pH affecte la disponibilité des éléments minéraux, ceci ne semble

pas être totalement vrai dans le cas de production des plants en conteneurs avec apport soutenu en éléments fertilisants sous forme d'engrais solubles (CPVQ, 1993). Le pH du substrat est directement affecté par la proportion de chaque constituant et des pratiques culturales notamment l'irrigation et la fertilisation.

Le pH pourrait être un indicateur de la maturité complète d'un substrat. La valeur du pH d'un compost mûr se situe normalement entre 7 et 8 (Larbi, 2006) et entre 7 et 9 (Bernal et al., 1998). À pH acide, le compost est considéré comme immature (Bernal et al., 1998). Le MCA, ayant un pH égal à 7,43, est considéré ainsi comme un substrat mûr. Toutefois, Duval (1991) cité par Kerkeni (2008) considère que le pH n'est pas une mesure très précise de la maturité du compost.

Les résultats exprimés dans le tableau 3 montrent que les substrats étudiés présentent des pH acides. L'addition du MCA au substrat a un effet hautement significatif sur l'élévation du pH. En effet, les valeurs de pH oscillent entre 5,04 et 6,93. Ces résultats s'accordent avec ceux de Wilson et al. (2001) cité par Kerkeni (2008) qui ont noté que l'augmentation du volume d'un compost de déchets solides (de 0 à 100%) élève le pH du substrat de culture, de 5,3 à 7.

Les pH les plus élevés sont enregistrés chez les substrats SE, SD et SE' alors que les valeurs les plus faibles correspondent aux substrats SA, SB et SA'. Pour le reste des substrats, les valeurs du pH sont variables. Selon Morel et al. (2000), un support de culture considéré comme satisfaisant doit avoir un pH variant entre 5,5 et 6,5.

Selon Verdonck (1988) cité par Kerkeni (2008), les substrats de culture devraient avoir un pH légèrement acide (5,2 à 6,3). Au delà de cette fourchette, des répercussions négatives pourraient avoir lieu sur la germination et l'émergence des semences. La fourchette donnée par CPVQ (1993) est légèrement plus large et elle donne des pH se situant entre 5 et 6,5. Si la valeur du pH d'un substrat dépasse 6,5, des carences peuvent se produire (Comtois et Légaré, 2004). Un pH excessif peut entraîner une forte accumulation de Ca ou de Na, alors qu'un pH inférieur à 5 peut entraîner des phénomènes de toxicité à cause d'une importante accumulation de fer (CPVQ, 1993 ; Landis, 1990 cité par Ammari et al., 2006).

Les faibles valeurs du pH peuvent être dues au fait que la tourbe, considérée comme constituant majeur des mélanges, possède une très faible valeur de pH. En comparant les pH de divers substrats par rapport à SA (témoin sans additif), on constate que l'apport du MCA a une influence significative sur les valeurs du pH. En effet, la composition diverse des substrats a un effet hautement significatif sur le pH. Les valeurs du pH augmentent, par conséquent, proportionnellement à l'augmentation de la proportion du MCA. Seul SE' présente un pH proche de 7 et dépassant toutes les normes. En se rapportant aux constatations rapportées par CPVQ (1993) et Comtois et Légaré (2004), des carences en (Fe, Cu, Mn, B) peuvent se produire et des excès possibles en (Ca, N) peuvent apparaître au niveau de ce substrat. Les résultats des tests de croissance restent les seuls à vérifier ces constatations.

Tableau 3 : Effet des combinaisons sur quelques propriétés chimiques

Substrats	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	S (g/l)
MCA	$7,43 \pm 0,29^a$	$1346 \pm 138,60^a$	0,94
SA	$5,04 \pm 0,18^e$	$1356 \pm 72,13^a$	0,95
SB	$5,57 \pm 0,45^{d,e}$	$805 \pm 14,14^c$	0,56
SC	$6,21 \pm 0,14^{c,d}$	$1347 \pm 192,33^a$	0,94
SD	$6,39 \pm 0,37^{b,c}$	$1351 \pm 132,94^a$	0,95
SE	$6,33 \pm 0,13^{b,c}$	$1387 \pm 63,64^a$	0,97
SA'	$5,77 \pm 0,20^{c,d}$	$1330 \pm 83,44^a$	0,93
SB'	$6,06 \pm 0,51^{c,d}$	$1047 \pm 103,24^b$	0,73
SC'	$6,10 \pm 0,13^{c,d}$	$1330 \pm 89,10^a$	0,93
SD'	$6,19 \pm 0,09^{c,d}$	$1235 \pm 42,43^b$	0,86
SE'	$6,93 \pm 0,13^{a,b}$	$811 \pm 50,91^c$	0,57

Parmi les propriétés d'un substrat idéal, établies par Lemaire et al. (1989), et rapportées par Morel et al. (2000), il faut avoir la capacité de tamponner les variations de la salinité et du pH lors des apports de solution nutritive, afin de limiter la CE dans une fourchette de 0,5 à 2 mS/cm et surtout ne pas interférer trop directement avec la composition de la solution nutritive. Le suivi de la salinité des substrats horticoles revêt donc une importance dans le contrôle de la fertigation (Cliche et al., 1998). Verdonck (1988) cité par Kerkeni (2008) affirme que les substrats de culture devraient avoir une faible CE inférieure à 3 mS/cm. Au delà de cette norme, des répercussions négatives pourraient avoir lieu sur la germination et l'émergence des semences (Castillo et al., 2004 cité par Kerkeni, 2008). Les substrats testés présentent tous des valeurs conformes avec les normes.

La CE peut constituer une indication sur la disponibilité des éléments minéraux dans le milieu de culture. La teneur élevée en sels affecte la croissance des végétaux qui peut résulter des brûlures aux racines et aux feuillages. Il est à noter que les plantes s'enracinent mieux dans un substrat contenant peu d'éléments nutritifs (Comtois et Légaré, 2004). Une valeur élevée représente une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption d'eau et d'éléments nutritifs par la plante et peut même brûler les racines. La salinité peut également se développer à partir de la minéralisation d'azote et de la production d'acides organiques (Epstein, 1997 cité par Tiquia, 2010).

L'addition du MCA au substrat a un effet hautement significatif sur les valeurs enregistrées de la CE (Tableau 3). Les valeurs les plus basses inférieures à 1 mS/cm sont relatives aux substrats SB et SE'. SB' présente une valeur de la CE égale à 1,04 mS/cm, alors que le reste des substrats possède des valeurs très proches. L'analyse statistique fait ressortir trois groupes. Le premier groupe comprend les substrats SA, SC, SD, SE, SA' qui ont dévoilé les valeurs les plus élevées (de 1,33 à 1,38 mS/cm). Le deuxième groupe est présenté par les substrats SB' et SD' qui ont montré des valeurs de la CE moins importantes. Le troisième groupe comprend les substrats SB et SE' ayant les valeurs les plus faibles.

Selon Fuchs et al. (2001), la CE du compost ne doit pas dépasser 4 mS/cm. La salinité excessive du compost peut être à l'origine de sa phytotoxicité (Mengel et al., 2001 cité par Tiquia, 2010). De ce fait, l'éventuelle phytotoxicité du MCA ne peut pas être due à sa salinité qui est très réduite. La biométhanisation, au contraire, réduit davantage la salinité du matériau de départ (fientes avicoles) du fait que le fumier selon Kerkeni (2008) est connu par sa teneur élevée en sels.

Fractions organique et minérale

Pour certains auteurs, la MO et plus particulièrement l'humus, serait un facteur de sécurité et d'économie dans la production végétale (Farinet et Niang, 2004). La tourbe est largement employée en pépinière comme un composant principal des substrats de culture grâce à sa haute teneur en MO (Leclerc, 2001). Selon l'analyse statistique (Tableau 4), une différence significative est enregistrée entre les dix substrats considérés, concernant leur teneur en MO (% MS). À l'exception du substrat SE qui se détache de l'ensemble des substrats, en présentant la plus faible teneur en MO (48,66%), les substrats SC, SD, SB', SC', SD', SE' peuvent être classés en un seul groupe, le reste des substrats (SA, SB, SA') présentent les teneurs en MO les plus élevées et ils constituent eux seuls un seul groupe.

Les fientes des poules pondeuses, d'après Levasseur et Aubert (2006), présentent un taux de MO de l'ordre de 58%. La Biométhanisation est à l'origine d'une réduction significative du taux de MO. La teneur relevée de MO dans le cas du MCA est moins élevée que celle au niveau des mélanges confectionnés. La dégradation de la MO des fientes avicoles pendant la Biométhanisation explique ce résultat. La teneur en MO est un des premiers critères sur lesquels on se base pour juger de la compostabilité d'un produit donné. L'activité microbienne est constatée suite à une diminution de la teneur en MO dans le produit. Elle est considérée par certains auteurs tels que Larbi (2006) comme un paramètre de qualité et de maturité des composts. De même, Mustin (1987) voit que, dans le cas des composts, la teneur en MO dépend essentiellement de son degré de maturité. Plus cette teneur est élevée plus le

phénomène de minéralisation est fort. D'après les directives de l'ASIC, rapportées par Fuchs et al. (2001), le compost mûr doit avoir une teneur en MO < 50% (% MS). Plus précisément, Waston (2003) cité par Kerkeni (2008) rapporte que pour un compost de qualité (du point de vue stabilité et maturité), la teneur en MO devrait être comprise entre 35 et 45% de % MS. Selon ce critère, le MCA est ainsi considéré comme produit très stable.

L'ajout de la tourbe semble perdre la stabilité des substrats. En effet, selon Fuchs (2003) cité par Kerkeni (2008), la tourbe est un substrat microbiologiquement inactif. De ce fait, le mélange du MCA et/ou du CSB avec la tourbe, fait introduire des microorganismes à partir du compost et ces derniers recommencent la dégradation de la MO de la tourbe, ce qui est responsable du manque de stabilité dans les substrats formés de tourbe en mélange (Kerkeni, 2008).

Tableau 4 : Effet des combinaisons sur les teneurs en matières organique et minérale

Substrats	MO (% MB)	MM (% MS)	MO (% MS)
MCA	38,01 ± 0,00 ⁱ	62,67 ± 2,94 ^a	37,33 ± 2,94 ^f
SA	93,84 ± 0,23 ^a	3,37 ± 0,09 ^f	96,63 ± 0,09 ^a
SB	74,69 ± 1,87 ^b	18,01 ± 0,24 ^e	81,99 ± 0,24 ^b
SC	60,69 ± 0,46 ^f	40,67 ± 2,14 ^c	59,33 ± 2,14 ^d
SD	63,51 ± 1,65 ^e	38,84 ± 0,44 ^c	61,16 ± 0,44 ^d
SE	49,67 ± 1,414 ^h	51,34 ± 4,99 ^b	48,66 ± 4,99 ^e
SA'	71,34 ± 0,47 ^c	27,23 ± 2,66 ^d	72,77 ± 2,66 ^c
SB'	66,17 ± 0,23 ^d	37,01 ± 0,82 ^c	62,99 ± 0,82 ^d
SC'	63,34 ± 0,94 ^{e,f}	38,34 ± 2,52 ^c	61,66 ± 2,52 ^d
SD'	60,67 ± 1,88 ^f	38,17 ± 0,82 ^c	61,83 ± 0,82 ^d
SE'	56,67 ± 1,41 ^g	41,67 ± 0,72 ^c	58,33 ± 0,72 ^d

Azote et rapport C/N

La tourbe présente la teneur en azote la plus faible, étant donné que ce substrat est utilisé pour sa qualité physique et non pour sa qualité chimique.

La valeur minimale en azote imposée par la Directive de la Communauté Européenne est de l'ordre de 0,6% alors que la valeur maximale imposée par la norme NF U 44-051 est d'environ 2% sur les supports de culture (Vanai, 1995). Au delà d'une valeur de 2%, le compost devrait être considéré comme un engrais organique (Vanai, 1995). Cette teneur dépend du degré de maturité qui est apprécié par le rapport C/N. Selon FAC (1995), la teneur en azote doit être comprise entre 0,92 et 2,76%.

La teneur élevée en azote du MCA (2,28%) est due à la richesse des déjections animales en général, et des fientes avicoles, en particulier, en azote (Siddiqui, 2004 cité par Kerkeni, 2008). Étant donné que le MCA possède une teneur assez élevée qui dépasse les teneurs acceptables relatives aux supports de culture, ce matériau organique ne peut pas être utilisé seul comme support de culture. Le recours au mélange du MCA avec la tourbe ou avec le CSB permet d'enrichir davantage les substrats confectionnés en termes d'azote, tout en respectant les normes établies dans ce cadre. Comme le CSB est relativement riche lui aussi en azote, les substrats à base du mélange (T + MCA + CSB) sont plus riches en azote que ceux à base du mélange (T + MCA) (Tableau 5).

Le rapport C/N est fréquemment utilisé pour évaluer le processus de minéralisation de la MO (Annabi, 2005) et comme indicateur de maturité des composts (Chefetz et al., 1996 cité par Larbi, 2006). Selon Vanai (1995), le rapport C/N varie largement selon l'origine des déchets compostés. Ce rapport est influencé directement par la teneur relative en azote du substrat, alors que la détermination du C/N d'un compost n'est pas suffisante pour déterminer sa maturité (Serra-Wittling et al., 1995).

Le rapport C/N décroît constamment au cours du compostage pour se stabiliser vers 10 (8 à 15) dans un compost mûr (Mustin, 1987). Ce paramètre présente néanmoins un défaut majeur, en raison du manque de valeurs de référence trop précises. Jiménez et Garcia (1992) cité par Larbi (2006) suggèrent un rapport inférieur à 12 qui reflète un degré de maturité du compost. Brasseur et Sullivan (2003) cité par Tiquia (2010) ont proposé un rapport C/N idéal s'étendant de 12 à 25.

Le faible rapport C/N du MCA (11,25) peut s'expliquer du fait que la minéralisation des composts d'origine animale est plus rapide que celle de la tourbe et du CSB (dégradation difficile des polymères : Lignine, cellulose, ...).

Le rapport C/N décroît significativement avec l'augmentation du pourcentage du MCA (Tableau 5). Ce paramètre dépend du type de compost utilisé et de son volume employé (Kerkeni, 2008). Selon Lemaire et al. (1989), les MO à C/N faible ou moyen ne conviennent pas pour l'obtention de supports de culture, car elles évoluent au cours du temps par minéralisation. Il en résulte des tassements, des variations de porosité liées aux pertes en MS et au colmatage par les

éléments fins ou colloïdaux, une concurrence pour l'oxygène entre les micro-organismes apparaît d'autant plus que la porosité diminue.

La tourbe se distingue nettement des composts avec une valeur beaucoup plus élevée (Larbi, 2006). De leur côté, Lemaire et al. (1989) mentionnent que le rapport C/N des substrats organiques naturels peut varier de 2 à 300. L'emploi de MO à C/N élevé (tourbes blondes, écorces de Pin) doit être préféré dans les supports de culture, car la décomposition lente perturbera moins le milieu physique (Lemaire et al., 1989). Dans le cas des produits issus du bois tel que le CSB, il faut ajouter au problème d'immobilisation de l'azote celui de la phytotoxicité. Selon ce critère, la tourbe et les substrats SB, SC et SA' ayant les rapports C/N les plus importants sont considérés les meilleurs parmi les substrats étudiés.

Tableau 5 : Effet de différentes combinaisons sur les rapports C/N relevés

Substrats	Corg (%)	NTK (%)	C/N	MO/N
MCA	25,60 ± 2,10 ^f	2,29 ± 0,13 ^a	11,25 ± 1,58 ^d	16,41 ± 2,26 ^d
SA	67,96 ± 0,06 ^a	0,86 ± 0,13 ^e	80,48 ± 12,72 ^a	114,44 ± 18,08 ^a
SB	57,49 ± 0,17 ^b	1,31 ± 0,02 ^{c,d}	44,06 ± 0,59 ^b	62,84 ± 0,84 ^b
SC	41,31 ± 1,53 ^e	1,26 ± 0,15 ^{c,d,e}	33,22 ± 5,15 ^{b,c}	47,71 ± 7,35 ^{b,c}
SD	42,62 ± 0,32 ^e	1,61 ± 0,46 ^{b,c}	27,72 ± 8,14 ^c	39,78 ± 11,66 ^c
SE	33,69 ± 3,57 ^f	1,16 ± 0,02 ^{d,e}	29,14 ± 2,56 ^c	42,10 ± 3,55 ^c
SA'	50,91 ± 1,90 ^c	1,62 ± 0,02 ^{b,c}	31,52 ± 0,76 ^c	45,06 ± 1,05 ^c
SB'	43,94 ± 0,60 ^d	1,67 ± 0,06 ^{b,c}	26,32 ± 0,53 ^c	37,74 ± 0,79 ^c
SC'	42,97 ± 1,80 ^e	1,62 ± 0,16 ^{b,c}	26,70 ± 3,68 ^c	38,31 ± 5,23 ^c
SD'	43,10 ± 0,59 ^e	1,74 ± 0,04 ^b	24,85 ± 0,84 ^c	35,65 ± 1,20 ^c
SE'	40,60 ± 0,52 ^d	1,68 ± 0,18 ^{b,c}	24,33 ± 2,97 ^c	34,95 ± 4,26 ^c

Éléments minéraux

La tourbe à l'état pur (SA) présente une très faible teneur en K (Tableau 6). Comme c'est déjà mentionné précédemment, la tourbe est utilisée pour ses caractéristiques physiques. Le MCA, au contraire, est un matériau plus riche en potassium. La teneur moyenne en potassium du MCA est de l'ordre de 1,83% en K.

L'amélioration du % K au niveau des substrats confectionnés augmente proportionnellement avec le % de présence du MCA dans ces substrats. De ce fait, plus l'incorporation du MCA est importante, plus la teneur devient intéressante. Ceci est vrai pour le cas des substrats à base de (T + MCA), le CSB comme la tourbe sont des substrats moins riches en éléments minéraux.

Le Ca rend le milieu favorable aux microorganismes, agents de la décomposition des MO, de l'humification, de la minéralisation et de la fixation symbiotique. Le MCA produit présente une teneur moyenne en Ca très élevée

de l'ordre de 4,13% (Tableau 6). Cette valeur est généralement supérieure à la teneur du fumier.

La teneur assez élevée du Na (0,9%) au niveau du MCA (Tableau 6) comparée à celle du compost urbain, dont la teneur est de l'ordre de 0,23% (Vanai, 1995), peut causer des risques de dégradation de structure des milieux comportant ce matériau. Parmi les risques liés à un excès du Na, une teneur assez élevée peut entraîner des effets dépressifs sur les cultures.

Les teneurs en Ca et en Na augmentent avec l'augmentation du % d'incorporation du MCA dans la composition des substrats confectionnés particulièrement pour le cas des mélanges (T + MCA). Pour le cas des substrats SB', SC', SD' ayant tous le même taux d'incorporation de MCA qui est de l'ordre de 20%, on constate que le taux du calcium augmente légèrement avec l'augmentation du taux de présence du CSB dans ces substrats. Le CSB est donc plus riche en cet élément, ce qui explique que SE' présente la teneur en sodium la plus élevée.

Tableau 6 : Effet de combinaisons sur les teneurs en certains éléments minéraux

Substrats	K (%)	Ca (%)	Na (%)
MCA	1,83 ± 0,35 ^a	4,13 ± 1,52 ^a	0,90 ± 0,14 ^a
SA	0,21 ± 0,13 ^d	0,97 ± 0,59 ^c	0,13 ± 0,04 ^e
SB	1,07 ± 0,02 ^c	2,42 ± 0,05 ^{a, b, c}	0,43 ± 0,04 ^d
SC	1,30 ± 0,04 ^{b, c}	2,76 ± 0,53 ^{a, b, c}	0,63 ± 0,04 ^{b, c}
SD	1,36 ± 0,16 ^{b, c}	2,92 ± 0,30 ^{a, b}	0,60 ± 0,07 ^{b, c, d}
SE	1,60 ± 0,18 ^{a, b}	3,77 ± 0,59 ^{a, b}	0,65 ± 0,07 ^b
SA'	0,98 ± 0,32 ^c	2,79 ± 1,19 ^{a, b, c}	0,48 ± 0,11 ^{b, c, d}
SB'	1,19 ± 0,09 ^{b, c}	2,19 ± 0,09 ^{b, c}	0,50 ± 0,07 ^{b, c, d}
SC'	1,03 ± 0,07 ^c	2,30 ± 0,07 ^{a, b, c}	0,45 ± 0,00 ^{c, d}
SD'	1,02 ± 0,33 ^c	2,64 ± 1,26 ^{a, b, c}	0,50 ± 0,14 ^{b, c, d}
SE'	1,14 ± 0,06 ^{b, c}	2,44 ± 0,41 ^{a, b, c}	0,53 ± 0,036 ^{b, c, d}

Dans l'ensemble, les résultats chimiques acquis confirment la qualité agronomique des mélanges préparés comparativement à la tourbe, substrat de référence, pauvre en éléments nutritifs mais non toxique (Vanai, 1995).

Les substrats en mélange présentent des teneurs convenables en MO. Sur le plan agronomique, les substrats de culture étudiés présentent des teneurs considérables en éléments minéraux (N, K, Ca et Na). Ces valeurs sont des indicateurs précieux de la fertilité chimique potentielle du MCA mis en jeu et elles déterminent les réserves en éléments minéraux de ce dernier.

Tenant compte de la valeur fertilisante élevée du MCA, de l'emploi conseillé d'un substrat de culture chimiquement relativement inerte et de la recherche des produits organiques pour des applications agronomiques (phytoprotection,

fertigation), l'extraction d'un tel type de méthacompost pourrait être très intéressante et pourrait déboucher sur la production et l'utilisation des méthacomposts épuisés en pépinière. L'extrait de méthacompost pourrait être employé comme fertilisant en pépinière à la place du jus de process, testé dans le cadre d'une autre étude. L'investigation à entreprendre, dans l'avenir, se rapporte à la maîtrise de la qualité des Co-produits de l'extraction des méthacomposts pour une meilleure valorisation en pépinière maraîchère hors sol. À cet égard, le MCA subit une double valorisation. Il s'agit, d'une part, d'une utilisation du Méthacompost Épuisé (Après Extraction) dans la confection des Substrats de Culture à base de Tourbe ou à base de Tourbe et de Compost Sylvicole, et d'autre part, d'une utilisation de l'Extrait ou Jus de Méthacompost en Fertigation des plants.

CONCLUSION

Les productions hors sol réclament l'emploi d'un substrat de culture de bonne qualité. Ce substrat doit répondre à certaines normes concernant divers paramètres : humidité, maturité, pH, C/N, et teneurs en éléments minéraux pour assurer le développement des plants de meilleure qualité.

La substitution partielle de la tourbe par le méthacompost avicole affiné (MCA) dans la confection des substrats de croissance des plants maraîchers, constitue le but recherché lors de cette investigation.

Les substrats testés ont montré une déficience de maturité, un pH acide et une salinité généralement faible. Le MCA peut être considéré non stable et relativement mûr et peut être exploité en horticulture, et notamment, en culture hors sol avec énormément de précautions. Pour les autres paramètres étudiés, le MCA est très riche en azote (> 1%) et riche en d'autres éléments minéraux (K, ...). Les résultats obtenus au cours de cette étude dévoilent des effets non négligeables du MCA sur certains paramètres physico-chimiques.

L'emploi de la tourbe en mélange avec du MCA et/ou du CSB comme substrats de culture s'avère encourageante et performante en termes de richesse globale en éléments minéraux. Cette richesse est plus intéressante dans le cas de mélange tourbe et MCA. Elle pourrait constituer un bon indice pour réduire le nombre de fertigations actuellement adoptées lorsque la tourbe est utilisée seule à l'état pur, d'où, le double intérêt du MCA comme substrat rétenteur d'eau (rôle physique) et riche en éléments minéraux (rôle chimique). Il convient de tenir compte de l'effet résiduel pour piloter la fertigation en pépinière hors sol.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBURQUERQUE J.A., GONZALVEZ J., GARCIA D., CEGERRA J. (2006). Measuring detoxification and maturity in compost made from « alpercijo », the solid by-product of extracting olive oil by the two-phase centrifugation system, *Chemosphere*, Vol. 64, Issue 3, 470-477.
- ALCOR et AXENNE (2003). Étude stratégique pour le développement des énergies renouvelables en Tunisie- Bilan des réalisations, Rapport final de l'Agence Nationale des Énergies Renouvelables (ANER), 148-157.
- AMMARI Y., LAMHAMEDI M.S., AKRIMI N., EL ABIDINE A.Z. (2006). Qualités physiologiques de jeunes plants de Pin d'Alep élevés en pépinière moderne sur différents substrats à base de compost, *Rev. Geo-Eco-Trop*, Vol.30, N°1, 11-24.
- ANDRE J.P. (1987). Propriétés chimiques des substrats. In: *Les Cultures Hors Sol*, D. Blanc, Ed. INRA, Paris, France, 127-147.
- ANNABI M. (2005). Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine : Relation avec les caractéristiques de leur matière organique, Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique (INA), Paris-Grignon, France, 280 p.
- APESA (2007). Méthanisation et production de biogaz : État de l'art (Version 1). Document Technique, 37 p.
- BENITO M., MASAGUER A., DE ANTONIO R., MOLINER A. (2005). Use of pruning waste compost as a component in soil-less growing media, *Bioresource Technol.*, Vol.96, Issue 5, 597-603.
- BERBERIS R., NAPPI P. (1996). Evaluation of compost stability, In: *The science of composting, Part I*, De Bertoldi M., Sequi P., Lemmes B., Papi T. (Ed.). Blakie Academic and Professional, London, 175-184.
- 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 Technol.*, Vol. 63, Issue 1, 91-99.
- BERNAL M.P., ALBURQUERQUE J.A., MORAL R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment, *Bioresource Technol.*, Vol.100, Issue 22, 5444-5453.
- CLICHE TH., GRENIER D., CARON J. (1998). Mesures in-situ des paramètres électriques de substrats organiques, Publication du Laboratoire de Radiocommunications et de Traitement du Signal (LRTS), 69-74.
- COMTOIS M., LÉGARÉ M. (2004). La fertilisation des plantes ligneuses cultivées en contenant. Programme Horti-2002, Direction de l'Innovation Scientifique et Technologique, Canada, 57 p.
- CPVQ (1993). Pépinières, Culture en conteneurs, Substrats. Document Technique réalisé par le Conseil des Productions Végétales du Québec (CPVQ), Canada, 19 p.
- FAC (1995). Compost and sewage sludge : Guidelines and Recommendations of the Research Center for Agricultural Chemistry and Environmental

- Science with respect to waste fertilizers. EDMZ Art. In: Fuchs J.G., Baier U., Berner A., Mayer J., Tammi L., Schleiss K., 2006. Potential of different composts to improve soil fertility and plant health. ORBIT: Part 2, 507-517.
- FARINET J.L., NIANG S. (2004). Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique francophone : Enjeux, concepts et méthodes. Chapitre V : Le recyclage des déchets et effluents dans l'agriculture urbaine, 142-170.
- FUCHS J.G., GALLI U., SCHLEISS K., WELLINGER A. (2001). Caractéristiques de qualité des composts et des digestats provenant du traitement des déchets organiques. Association Suisse des Installations de Compostage (ASIC) & Forum Biogaz Suisse, 26 p.
- GARCIA-GOMEZ A., BERNAL M.P., ROIG A. (2002). Growth of ornamental plants in two composts prepared from agroindustrial wastes, *Bioresource Technol.*, Vol.83, Issue 2, 81-87.
- GOYAL S., DHULL S.K., KAPOOR K.K. (2005). Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity, *Bioresource Technol.*, Vol.96, Issue 14, 1584-1591.
- GRAS R. (1987). Propriétés physiques des substrats. In : *Cultures Hors Sol*, D. Blanc, Ed. INRA, Paris, France, 79-126.
- ISO (1994). Qualité du sol : Détermination du pH (ISO 10390) et de la CE spécifique (ISO 11265), International Standardisation Organisation (ISO), 4 p.
- JUSTE C., SOLDA, P., DUREAU P. (1985). Test agronomique simple destiné à juger rapidement de la phytotoxicité éventuelle et du degré de maturité d'un compost d'ordures ménagères. Chapitre d'ouvrage édité - BMA : Utilisation agricole des déchets. Résultats de dix années de recherches. Comité "Sols et Déchets" 1973-1983. Document élaboré par l'Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets (ANRED), Nantes, France, 4 p.
- KERKENI A. (2008). Contribution à la valorisation des composts et des jus de composts : Incidence sur la fertilisation et la protection phytosanitaire de quelques espèces légumières. Thèse Agriculture Durable pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques de l'Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem (ISA-CM), Tunisie, 158 p.
- LAMHAMEDI M.S., FORTINN J.A., AMMARI Y., BEN JALLOUN S., POIRIER M., FECTEAU B., BOUGACHA A., GODIN L. (1997). Évaluation des composts, des substrats et de qualité des plants élevés en conteneurs. Rapport technique : Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie. Publication de DGF de Tunisie et Pampev Internationale Ltée, Québec, Canada, 121 p.
- LARBI M. (2006). Influence de la qualité des composts et de leurs extraits sur la protection des plantes contre les maladies fongiques. Thèse de Doctorat de l'Université de Neuchâtel, Suisse, 15-21.

- LECLERC B. (2001). Guide des matières organiques, Collection Guide Technique de l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB), Tome 1, 2^{ème} édition, 01/2001, 238 p.
- LEMAIRE F., DARTIGUES A., RIVIÈRE L.M., CHARPENTIER S. (1989). Cultures en pots et conteneurs : Principes agronomiques et applications, Editions INRA, Paris & PHM-Revue Horticole, Limoges, France, 181 p.
- LETARD M., ERARD P., JEANNEQUIN B. (1995). Maîtrise de l'irrigation fertilisante. Tomate sous serre et abris en sol et hors-sol, Paris, CTIFL, 220 p.
- LEVASSEUR P., AUBERT Cl. (2006). Contexte, atouts et faiblesses des effluents porcins et avicoles destinés à être exportés. Techniporc, Vol. 29, N°2, 2006, 3-11.
- MICHEL J.Ch. (sd). Les propriétés physiques des tourbes : Une qualité majeure à leur utilisation comme support de culture. Sciences Agronomiques Appliquées à l'Horticulture (SAGAH). INRA-INH, Université d'Angers, France, 7 p.
- MOREL P., PONCET P., RIVIÈRE L.M. (2000). Les supports de culture horticoles : Les matériaux complémentaires et alternatifs à la tourbe. Éditions INRA, Paris, France, 84 p.
- M'SADAK Y., BEN M'BAREK A., BARAKET S. (2010). Agronomic interest of the residues of rural biometanisation applied to the bovine biomass. Displays, ISOFAR /MOAN Symposium: Soil Fertility and Crop Nutrition Management in Mediterranean Organic Agriculture. , 23-25 March 2010, Sousse, Tunisia.
- M'SADAK Y., BEN M'BAREK A., ZOGHLAMI R.I., BARAKET S. (2011). Caractérisation des Co-produits de la Biométhanisation appliquée à la biomasse animale, Rev. Energies Renouv., Vol. 14, N°2, 343-356.
- M'SADAK Y., BEN M'BAREK A., TAYACHI L. (2012a). Possibilités d'incorporation du méthacompost avicole dans la confection des substrats de culture à base de compost sylvicole en pépinière forestière, Revue Nature & Technologie, N° 6, 59-70.
- M'SADAK Y., ELOUAER M.A., EL KAMEL R. (2012b). Comportement physique des composts, des tamisats et des mélanges pour une meilleure exploitation en pépinière : Caractérisation physique des composts bruts, criblés et en mélange, E-Revue de Génie Industriel, N° 8, 44-54.
- M'SADAK Y., ELOUAER M.A. (2013a). Chemical Characterization of Acacia cyanophylla Compost as Growth Substrate, Report and Opinion, Vol.5, N°2, 20-25.
- M'SADAK Y., ELOUAER M.A., DHAHRI M. (2013b). Caractérisation physique des substrats de croissance pour une meilleure adaptation à la filière horticole en Tunisie, Revue Nature & Technologie, N° 9 (B), 27-34.
- M'SADAK Y., BEN M'BAREK A., TAYACHI L. (2013c). Comportement des plants d'Acacia installés sur des substrats à base de compost sylvicole avec

- ou sans méthacompost avicole dans une pépinière moderne en Tunisie, *J. Fund. Appl. Sci. (JFAS)*, Vol. 5, N° 1, 38-50.
- M'SADAK Y., BEN M'BAREK A. (2013d). Energy, environmental and agronomic valorizations of the rural biomethanisation of the bovine biomass, *Int. J. Innov. Appl. Stud. (IJIAS)*, Vol. 4, N°2, 343-352.
- M'SADAK Y., BEN M'BAREK A. (2014). Caractérisation physico-hydrigue des substrats de culture à base de méthacompost avicole pour une meilleure valorisation, *Larhyss Journal*, N° 20, 167-187.
- MUSTIN M. (1987). *Le compost : Gestion de la matière organique*, Edition François Dubusc, Paris, France, 954 p.
- SERRA-WITTLING C., HOUOT S., BARRIUSO E. (1995). Soil enzymatic reponse to addition of municipal solid-waste compost, *Biol. Fertil. Soils*, Vol.20, Issue 4, 226-236.
- SIMINS H.I., MANIOS V.L. (1990). Mixing peat with MSW compost, *Biocycle*, Vol. 31, p. 60-61.
- TIQUIA S.M. (2002). Evolution of extra cellular enzyme activities during manure composting, *J. Appl. Microbiol.*, Vol.92, Issue 4, 764-775.
- TIQUIA S.M. (2003). Evaluation of organic matter and nutrient composition of partially decomposed and composted spent pig litter, *Environ. Technol.*, Vol.24, Issue 1, 97-107.
- TIQUIA S.M. (2010). Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition, *Chemosphere*, Vol.79, Issue 5, 506-512.
- VANAI P. (1995). Valorisation agronomique d'un compost urbain produit par méthanisation : Étude en milieu tropical, Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences de l'Université Française du Pacifique (UFP), Spécialité Chimie, 172 p.
- VEENKEN A., NIEROP K., DE WILDE V., HAMELERS B. (2000). Characterization of NaOH extracted humic acids during composting of a biowaste, *Bioressource Technol.*, Vol.72, Issue 1, 33-41.
- ZUHANG H., MUSARD M., DUMOULIN J., THICOIPE J.P., LETARD M., VAYSSE P., ADAM D. (1984). *Cultures légumières sur substrats : Installations et conduite*, Publication du Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (CTIFL), Paris, France, 215 p.