

---

Soumis le : 30 Avril 2010  
 Forme révisée acceptée le : 20 Mai 2011  
 Email de l'auteur correspondant :  
 msadak.youssef@yahoo.fr

---

## Possibilités d'incorporation du méthacompost avicole dans la confection des substrats de culture à base de compost sylvicole en pépinière forestière

M'SADAK Youssef\*, BEN M'BAREK Abir \*, TAYACHI Leila\*

\* Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem, CP 4042, Université de Sousse, Tunisie

### Résumé

Vers la dernière décennie et suite aux conditions de plus en plus intensives de production hors sol des plants forestiers, l'utilisation d'un substrat de culture dont les propriétés physico-chimiques sont optimales, pour la croissance et la physiologie des plants forestiers lors des différentes phases de croissance en pépinière forestière, s'avère indispensable. Pour avoir un tel substrat, il s'avère nécessaire de caractériser et d'optimiser les paramètres de porosité (teneurs en air et en eau) et la richesse initiale du substrat en éléments minéraux. Le recours au digestat particulièrement le Méthacompost Avicole (MCA), qui est la fraction solide du digestat issu de la biométhanisation des fientes avicoles, en remplacement partiel du Compost Sylvicole Brut (CSB) formant le substrat de référence pour la production des plants forestiers pourrait constituer une alternative très prometteuse. La présente étude a pour objectif d'évaluer la qualité du CSB et les possibilités d'amélioration de ses propriétés physico-chimiques, en le mélangeant avec le Méthacompost Avicole Affiné à la sortie du digesteur (MCA<sub>dig</sub>) ou à la sortie du décanteur (MCA<sub>déc</sub>). A cet effet, des tests de porosité et des analyses chimiques de substrats confectionnés ont été effectués.

Les résultats essentiels de ce travail sont les suivants :

- De point de vue physique, le CSB ne peut pas être considéré comme bon substrat de culture, à cause de sa porosité de rétention (Pr) relativement insuffisante due généralement au diamètre relativement élevé des particules. Il s'agit d'un substrat aérateur, ce qui justifie son mélange, selon le ratio convenable, avec les MCA qui sont au contraire des substrats rétenteurs d'eau.
- L'incorporation des MCA considérés s'est avérée 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 MCA<sub>dig</sub> et le MCA<sub>déc</sub> de point de vue physique. Sur le plan composition chimique, le MCA<sub>déc</sub> a montré une légère supériorité en éléments minéraux (MO, NPK, ...).

Cependant, il reste à évaluer les effets de ces différents substrats sur la croissance et la physiologie des plants résineux et feuillus en conditions de pépinière forestière.

*Mots clés* : Méthacompost avicole ; compost sylvicole ; porosité ; composition chimique ; substrat de culture.

### Introduction

Le traitement des déchets est devenu une nécessité primordiale pour la protection de l'environnement [34]. Les gouvernements sont constamment à la recherche de solutions technologiques permettant un traitement efficace

et moins coûteux des déchets. En Tunisie, la démarche adoptée actuellement est l'exploitation de nouvelles technologies en vue de valoriser davantage les déchets organiques dans les domaines agricole et énergétique, ce qui permettra de consolider les programmes d'économie d'énergie. Il existe, en effet, plusieurs opportunités de recyclage de déchets organiques, notamment pour la production d'énergie et la fertilisation des terres agricoles,

de manière à réduire la quantité de déchets organiques abandonnés et à diversifier les sources d'énergie de substitution. D'après [36], une des technologies permettant le traitement de la fraction organique de ces déchets est la biométhanisation qui peut transformer un problème des déchets en une source d'énergie avec valorisation agronomique possible des résidus qui en sont issus.

L'emploi de la Digestion Anaérobie (DA) a des atouts indéniables pour s'imposer dans de nombreux secteurs générateurs de déchets, particulièrement agricoles d'origine animale. Elle devient une alternative au compostage [18], dans la mesure où elle est particulièrement adaptée au traitement de déchets humides en grandes quantités, en zones de forte densité de population. Selon [14], bien que la digestion des déchets se développe lentement mais sûrement, elle reste néanmoins accessoire comparée aux technologies concurrentes (compostage, décharge).

Le traitement anaérobie par biométhanisation aboutit à la formation d'un produit plus ou moins liquide, appelé digestat [41], constitué de la fraction peu ou difficilement biodégradable du déchet entrant [30]. Ce produit est mal connu et peu étudié dans la littérature [35]. Dans un projet de biométhanisation, le digestat est à considérer comme un produit à valoriser au même titre que l'énergie issue du biogaz [8 ; 3 ; 9].

Plusieurs recherches ont montré que les composts, produits de divers déchets, ont des effets bénéfiques dans les systèmes de production en pépinières horticoles et forestières [22] et pourraient ainsi servir comme un substitut partiel ou total à la tourbe lors de la confection des substrats de culture [44]. Cette option permet de réduire les coûts de production des substrats tout en respectant les normes d'une agriculture durable [20].

La tourbe couramment utilisée dans la confection des substrats de croissance est une ressource non renouvelable [17; 44]. Il serait intéressant de développer la recherche de produits alternatifs et d'inciter à l'utilisation des produits de substitution partielle.

Le digestat, co-produit secondaire de la biométhanisation, peut être utilisé comme matière première pour le compostage de déchets organiques solides (fientes de volailles, fumiers de bovins), comme il peut être épandu directement sur les terres agricoles comme fertilisant. Le conditionnement de ce digestat permet l'obtention d'un digestat solide appelé méthacompost et d'un digestat liquide appelé couramment jus de process ou lixiviat.

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. Cette solution présente certaines limites concernant les caractéristiques physico-chimiques des substrats.

Le présent travail est orienté essentiellement vers la mise au point des substrats de croissance, à base de mélange de Compost Sylvicole Brut (CSB) et de MCA,

adéquats pour une éventuelle production hors sol des plants forestiers. L'objectif général de cet article étant l'identification de la proportion maximale du MCA à incorporer au CSB, à travers l'évaluation directe et la comparaison des propriétés physico-chimiques de différents substrats confectionnés.

## 1. Matériel et méthodes

### 1.1. Identification des substrats de culture testés

#### Substrats purs

- CSB : 100 % Compost Sylvicole Brut, produit sur la plate-forme de compostage rattachée à la pépinière forestière moderne de Chott-Mariem (Sousse, Tunisie) à partir du rebroyat des branches d'*Acacia cyanophylla*, bien répandues en Tunisie [34], par simple broyage à couteaux suivi d'un simple broyage à marteaux (avec grille de calibrage à trous ronds de 30 mm de diamètre). Dans l'ensemble, la taille dominante des particules compostées est comprise entre 5 et 25 mm. Cette dimension est le résultat d'une importante biomasse ligneuse mise en broyage (78% contre 22% de biomasse foliaire), suite au diamètre broyable des branches, fixé à la limite de 8 cm.

- MCA, objet de cette recherche, est issu de la biométhanisation industrielle de la biomasse avicole. Le digesteur industriel adopté, produisant ce résidu, constitue un projet pilote de production de biogaz localisé à Hammam Sousse (Sousse, Tunisie). Ce projet pilote 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 [2].

Les fientes digérées produites traversent trois bassins différents : Un premier bassin en acier, pour un faible temps de séjour, avant de séjourner dans le bassin de décantation. À partir de ce dernier, les boues de fientes décantées seront séchées et transformées en fertilisants. Quant à l'eau surnageant le bassin de décantation, elle passe dans le troisième bassin pour servir au raclage des fientes fraîches des poulaillers [2].

\* MCA<sub>dig</sub>: 100 % Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

\* MCA<sub>déc</sub>: 100 % Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur).

#### Substrats à base de mélange

À partir de trois produits purs cités précédemment, on a réalisé huit mélanges, tout en substituant partiellement le CSB par le MCA (% volume). On a utilisé différentes combinaisons du CSB et du MCA pour évaluer si le MCA pourrait réellement être un substitut du CSB. Les mélanges testés sont répartis en deux séries présentées dans le tableau

1. Il s'agit de déterminer les mélanges les plus adéquats, pouvant être utilisés comme substrats de culture pour la production des plants forestiers en pépinière hors sol, en les comparant avec les résultats obtenus pour le CSB utilisé comme support de référence. Au total, il s'agit de 11 substrats de culture mis aux essais.

Tableau 1.

Identification et composition des mélanges confectionnés

Mélanges CSB + MCA <sub>déc</sub>			Mélanges CSB + MCA <sub>dig</sub>		
Substrats	% CSB	% MCA <sub>déc</sub>	Substrats	% CSB	% MCA <sub>dig</sub>
S1	80	20	S5	80	20
S2	70	30	S6	70	30
S3	60	40	S7	60	40
S4	50	50	S8	50	50

### 1.2. Évaluation de la qualité physique des substrats purs et des mélanges

Tout matériau entrant dans la composition d'un support de culture doit nécessairement répondre à un certain nombre de caractéristiques physiques et chimiques prouvant son aptitude à permettre la croissance d'une plante [32].

La porosité ou l'espace poral correspond à l'évaluation des espaces vides par rapport à l'encombrement total d'un substrat [31]. La Porosité totale (Pt) est exprimée par un rapport entre le volume d'espaces vides ( $V_v$ ) au volume total ou volume apparent ( $V_a$ ). Le volume apparent correspond à la somme du volume de la phase solide et du volume des vides.

La détermination des caractéristiques physiques d'un substrat de croissance joue un rôle important pour les cultures hors sol. Les trois porosités sont dépendantes les unes des autres. Signalons ainsi que le test standard de porosité permet d'apprécier les trois porosités en question [13] :

- La porosité totale (Pt) est déterminée par le rapport entre le volume versé à la saturation du substrat en eau et le volume total (attente d'une heure environ, puis ajout de l'eau, s'il est nécessaire pour avoir une bonne saturation en eau du substrat).

- La porosité d'aération (Pa) est déterminée par le rapport entre le volume ressuyé à travers les trous de drainage sous l'effet des forces de gravité et le volume total (en laissant l'eau s'infiltrer pendant 10 mn environ).

- La porosité de rétention (Pr) est déterminée par différence entre la porosité totale et la porosité d'aération.

Les conditions tunisiennes exigent les proportions de porosité suivantes :  $P_t \geq 50\%$ ,  $P_a \geq 20\%$  et  $P_r \geq 30\%$ . Ces règles à respecter ont été inspirées des normes canadiennes [13] en favorisant la rétention sur l'aération, en raison du climat sec de la Tunisie.

L'évaluation des porosités a été effectuée sur les différents substrats purs ou en mélange. Au total : 3 substrats purs + 8 mélanges = 11 substrats de culture mis à l'essai par le test standard de porosité, réalisé sur terrain (trois répétitions).

### 1.3. Évaluation de la qualité chimique des substrats purs et des mélanges

**Considérations chimiques :** Il est nécessaire d'avoir une connaissance sur la réactivité chimique des substrats afin de garder la maîtrise de l'apport nutritionnel. Ainsi, il est indispensable de faire l'analyse chimique des substrats pour définir les conditions optimales de leur emploi en culture hors sol [28]. D'après [24], pour définir des conditions optimales de l'utilisation d'un substrat de culture adapté pour la production de plants forestiers, il est conseillé de faire au moins des analyses de certains critères paraissant essentiels (pH, conductivité électrique CE et rapport C/N).

Il s'agit donc de faire appel à une caractérisation directe des propriétés chimiques des substrats de culture mis à l'essai, par des analyses de laboratoire. Notons que la caractérisation chimique mise en œuvre a concerné cinq substrats dont les trois purs considérés et les deux meilleurs mélanges de point de vue porosité parmi les huit mélanges étudiés (meilleur substrat de chaque série de mélanges). Cette caractérisation a été également effectuée sur trois échantillons par substrat pour chaque paramètre relevé.

**pH :** La mesure du pH est réalisée selon la norme internationale [21]. Le pH est mesuré après mise en solution de 20 g de l'échantillon, dans 100 ml d'eau distillée. La méthode employée consiste à préparer une suspension du substrat dilué séché dans 5 fois son volume d'eau (1 : 5), la laisser en agitation pendant 5 mn puis la faire reposer pendant au moins deux heures. La lecture du pH se fait moyennant un pH-mètre.

**Conductivité Électrique :** La Conductivité Électrique (CE) est la mesure de la concentration des ions solubles afin d'apprécier la salinité du substrat [42]. Elle est mesurée par le conductimètre et elle est exprimée en (mS/cm) ou (mmhos/cm<sup>3</sup>). La norme internationale [21] prescrit une méthode de sa mesure. Un échantillon de substrat est extrait avec de l'eau à  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  (Rapport d'extraction de 1: 5 pour dissoudre les électrolytes).

**Matière organique :** La détermination de la Matière organique (MO) et des cendres est effectuée suivant la Norme Tunisienne (NT) relative au dosage de la MO du fumier. La méthode considérée pour la détermination du taux de la MO au niveau de chaque substrat comporte les étapes suivantes :

- On pèse 20 g de chaque substrat et on met les échantillons dans l'étuve pendant 24 heures à  $70^\circ\text{C}$  ;

- On réalise la calcination de 3 g des échantillons, préalablement séchés pendant 2 heures à l'étuve, à  $900^\circ\text{C}$

pendant au moins 6 heures dans un four à moufle et on détermine le résidu sec ou masse après calcination.

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

$$\text{MO (\%)} = ((M1 - M2) / M1) \times 100$$

**Avec :** M1: Masse avant calcination (mg) ; M2: Masse après calcination (mg).

À partir de la MO, une déduction de la teneur en Carbone Organique Total (COT) sera possible tout en appliquant la relation suivante :

$$\text{COT (\%)} = (\text{MO (\%)} / 1,8) \times 100$$

**Azote :** L'azote (N) est dosé par la méthode de Kjeldhal [19] dont le principe repose sur l'attaque de l'extrait par l'acide sulfurique concentré (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Le dosage d'azote repose sur le principe décrit dans ce qui suit. Dans chaque matras à digestion, on introduit 200 mg du substrat tout en évitant d'en déposer sur le col du matras et 5 ml d'acide sulfurique concentré ; c'est la phase de minéralisation. Après un repos de 30 minutes, on ajoute 200 mg de catalyseur à base de sélénium et on passe les matras dans le digesteur pour se chauffer pendant 1 heure jusqu'à l'obtention d'une couleur jaune ; c'est la phase de digestion. Après refroidissement, on ajoute 30 ml d'eau distillée dans le matras et on le fixe à l'appareil à entraînement par la vapeur et on lui ajoute 30 ml de lessive de soude pour alcaliniser le milieu ; c'est la phase de distillation.

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.

**Phosphore :** Le dosage du phosphore (P) s'effectue par spectrométrie d'absorption atomique. Il est effectué en présence d'un réactif vitrovandomolybdate.

L'acide phosphorique donne un complexe phosphomolybdique jaune dont la densité optique est mesurée par spectrophotométrie à 430 nm.

Après la calcination des échantillons dans le four à moufle, on leur ajoute de l'eau distillée pour obtenir une solution saline de cendres. Dans une fiole jaugée de 25 ml, on prélève 10 ml de la solution saline déjà préparée. On ajoute 5 ml de réactif nitrovanadomolybdique et on complète jusqu'au trait de jauge avec l'eau distillée. On attend 1 heure avant de les faire passer au photo colorimètre.

**Autres éléments minéraux :** Le dosage du potassium (K) et du calcium (Ca) a été réalisé 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. Dans ce qui suit, les étapes de la minéralisation des échantillons considérés sont relatées.

On pèse 1 g de chaque substrat dans une capsule en porcelaine et on les met dans le four à moufle pour subir une calcination (2 heures à une température de 220 °C et 6 heures à une température de 550 °C). On ajoute, après refroidissement, 2 ml d'acide chlorhydrique (HCl) concentré dans chaque capsule. On chauffe les substrats dans un bain à sable jusqu'à l'évaporation totale de l'acide. On ajoute 5 ml d'HCl (N/10) et on filtre les solutions obtenues dans des fioles jaugées de 100 ml et on ajoute l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. On passe les échantillons dans le photomètre à flamme après avoir passé les solutions d'étalonnage appropriées à chaque élément minéral.

#### 1.4. Analyses statistiques des données

Les données mesurées, suite à l'évaluation directe de chaque paramètre étudié, ont été analysées en utilisant le logiciel statistique SPSS.17. Le dépouillement statistique mis en oeuvre fait appel respectivement à l'analyse de la variance (ANOVA) et à la comparaison des moyennes de différents types de traitement (Test Duncan) tout en recherchant là où les moyennes sont considérées comme étant égales, si au contraire, il y a une différence significative, le Test Duncan permet de compléter l'interprétation et d'identifier les groupes de moyennes homogènes.

## 2. Résultats et discussion

### 2.1. Appréciation de la qualité physique des substrats

**Cas des substrats purs :** La figure 1 ci-après illustre les valeurs de porosité obtenues pour les trois substrats purs considérés.

En se référant aux résultats obtenus, on peut constater que tous les substrats purs (CSB, MCA<sub>dig</sub> et MCA<sub>déc</sub>) répondent aux normes concernant la Pt [13].

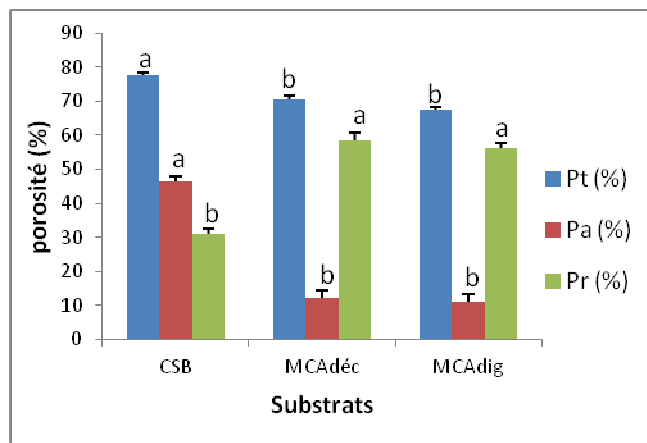
La Pt des substrats peut être influencée par la variabilité dimensionnelle dominante des particules, les propriétés physiques et chimiques et la nature du mélange.

Le CSB est caractérisé par une Pt et une Pa importantes et une Pr relativement acceptable. Ses particules grossières (refus relativement élevé de la maille carrée de criblage vibrant 10 mm) favorisent la Pa, et par conséquent, il est considéré comme substrat aérateur.

Les deux MCA possèdent des valeurs de Pt inférieures à celle du CSB ce qui peut être due à ses dimensions granulométriques partiellement hétérogènes (affinage irrégulier).

Le MCA<sub>dig</sub> et le MCA<sub>déc</sub> présentent une Pr élevée et une Pa faible, ce qui est en opposition avec les normes. Les

particules fines de tels substrats permettent de stocker plus d'eau dans les micropores et donc avoir une disponibilité en eau (Pr) élevée, et par conséquent, ils peuvent être considérés comme substrats rétenteurs.



CSB: Compost Sylvicole Brut, MCAdec: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur), MCAdig: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

Les moyennes de chaque paramètre (colonnes de même couleur) suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 1. Porosité de différents substrats purs testés

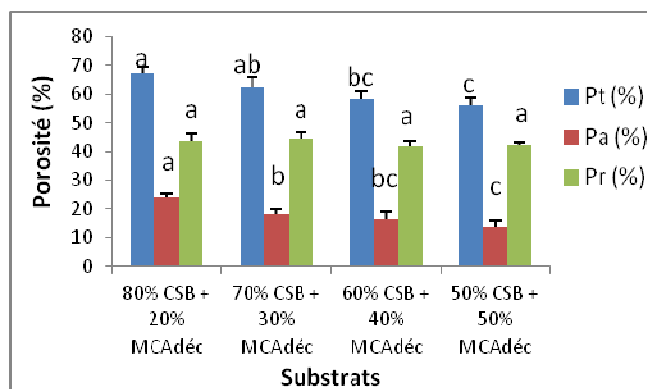
Un bon substrat doit répondre à certains critères notamment, une bonne capacité de retenir l'eau, à drainer et à se réhumidifier facilement [46]. La tourbe est largement employée en pépinière comme un composant principal des substrats de culture grâce à sa grande capacité de rétention d'eau [26]. Le MCA présente une capacité de rétention en eau proche de celle de la tourbe.

D'après [31], on cherche actuellement à utiliser un compost de bonnes Pt, Pa et Pr. D'où, le MCA, à l'état pur, devrait être évité pour ne pas affecter l'aération, en réduisant l'espace lacunaire favorisant ainsi l'empatement du substrat.

Pour équilibrer la disponibilité insuffisante en eau du CSB, l'utilisation du MCA semble nécessaire pour améliorer sa teneur en eau. En plus, le MCA, dans ses deux états, exige un substrat aérateur tel que le CSB afin de corriger la Pa et obtenir un équilibre physique proprement dit. Il est nécessaire dans ce cas de chercher le meilleur ratio de mélange pour une meilleure optimisation physique.

**Cas des mélanges confectionnés :** Les valeurs obtenues de Pt pour les divers substrats (CSB + MCA<sub>dec</sub>) donnent une pleine satisfaction puisqu'elles sont supérieures à 50 %. L'analyse des résultats du test standard de porosité relatifs aux divers mélanges (Figure 2) permet de déduire que les substrats élaborés répondent aux normes de point de vue Pt et Pr. Seul le mélange (80 % CSB + 20 % MCA<sub>dec</sub>) répond aux normes concernant la Pa. L'addition du MCA au CSB dans la fabrication des substrats de culture diminue

donc Pt et Pa et favorise, au contraire, la rétention d'eau au niveau du substrat.

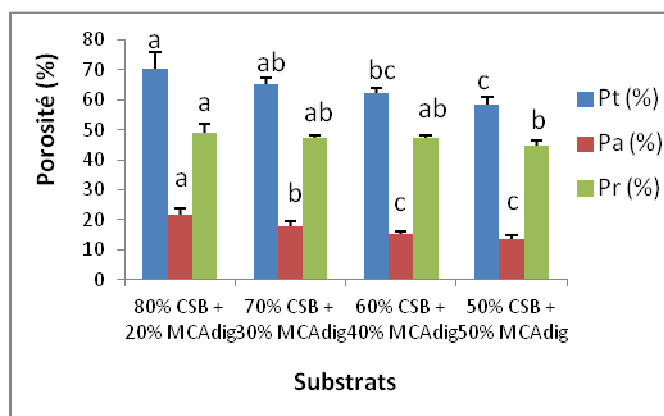


CSB: Compost Sylvicole Brut, MCAdec: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur).

Les moyennes de chaque paramètre (colonnes de même couleur) suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 2. Porosité des substrats à base de mélange CSB et MCAdec

Pour le cas du mélange CSB avec MCA<sub>dig</sub>, les quatre mélanges répondent aux normes pour la Pt et la Pr (Figure 3). Le substrat le plus poreux (70,5 %) est celui formé de 80 % CSB + 20 % MCA<sub>dig</sub>. Il est aussi le seul qui répond aux normes de porosité. Les trois autres mélanges ne répondent pas aux normes concernant Pa.



CSB: Compost Sylvicole Brut, MCAdig: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

Les moyennes de chaque paramètre (colonnes de même couleur) suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 3. Porosité des substrats à base de mélange CSB et MCA<sub>dig</sub>

On vient de voir que les deux MCA ne présentent pas des différences remarquables de point de vue propriétés physiques. La différence pourrait apparaître concernant la maturation. Le méthancompost collecté à la sortie du digesteur (MCA<sub>dig</sub>) est en principe plus mûr, étant donné son séjour prolongé dans le digesteur.

Le MCA employé comme substitut partiel du CSB est un facteur de variation d'une grande importance. Son intégration, même en faible pourcentage, a un effet hautement significatif et considérable sur la porosité des substrats.

Les divers mélanges se comportent tous presque de la même manière. L'analyse statistique montre que la composition du substrat a un effet hautement significatif sur ce paramètre. Il y a une chute notable des valeurs de Pt suite au recours au mélange. L'emploi du MCA nécessite de tenir compte de ses caractéristiques et de prendre les précautions nécessaires.

Les résultats du test standard de porosité réalisés sur MCA<sub>déc</sub> et MCA<sub>dig</sub> ont montré que ces méthacomposts répondent aux normes de porosités Pt et Pr, toutefois, leur Pa est moins importante et au-dessous des normes de porosité retenues pour les substrats de culture. Il s'agit donc des substrats rétenteurs et qui doivent être incorporés partiellement avec un substrat aérateur comme le CSB pour confectionner des mélanges adéquats. Devant une telle situation, le méthacompost ne peut être qu'un substitut partiel du terreau à faible proportion. Il faut faire attention donc aux proportions employées de ce produit organique.

Le recours au mélange d'un ou de plusieurs constituants ensemble selon les ratios adéquats ne peut pas être une solution définitive pour optimiser les paramètres physiques et hydriques à l'échelle du substrat. On peut faire recours à l'ajustement de la granulométrie par criblage et/ou affinage.

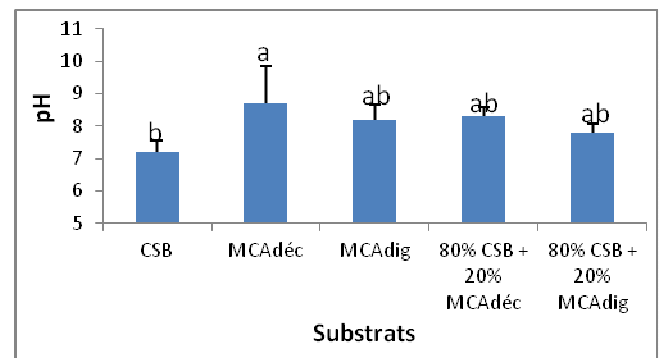
On a retenu les deux mélanges 80 % CSB + 20 % MCA<sub>déc</sub> et 80 % CSB + 20 % MCA<sub>dig</sub> comme meilleurs substrats de point de vue propriétés physiques.

## 2.2. Appréciation de la qualité chimique des substrats

**pH :** Le pH pourrait être un indicateur de la maturité complète d'un compost. La valeur du pH d'un compost mûr se situe normalement entre 7 et 8 [25] ou entre 7 et 9 [10]. Les MCA employés, comme substituts partiels du CSB, sont à considérer ainsi comme substrats mûrs. Les valeurs du pH de différents substrats testés (Figure 4) sont élevées. Seul le CSB présente une valeur acceptable, inférieure à 7,5. Pour un pH supérieur à 7,5, l'absorption du Fe par la plante devient très limitée et pour un pH supérieur à 8,5, le milieu devient fortement alcalin et l'assimilation du Cu, Zn, Mn, Fe et N tend à diminuer progressivement [3]. L'addition du MCA au CSB, à faible proportion, a un effet significatif sur l'augmentation du pH.

Par comparaison aux travaux antérieurs sur le compostage de la biomasse sylvicole en Tunisie [4], la valeur moyenne du pH du CSB est acceptable (pH proche de la neutralité). Selon [4], le pH relativement neutre du compost mature à base d'Acacia combiné à la mauvaise qualité de l'eau d'irrigation pourraient affecter négativement la disponibilité des éléments nutritifs dans la rhizosphère des plants. Le pH élevé en réponse à l'ajout de la fiente traitée (méthacompost) n'est pas habituellement

apprécié. Par contre, d'après [5], un substrat à base de tourbe et de vermiculite montrant un pH faible est fortement recherché.



CSB: Compost Sylvicole Brut, MCA<sub>déc</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur), MCA<sub>dig</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

Les moyennes de chaque paramètre suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 4. pH de différents substrats testés

**Conductivité Électrique :** Selon [39], 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 de certaines essences forestières. Les substrats évalués (Figure 5) présentent tous des valeurs conformes avec les normes établies pour les supports de culture.

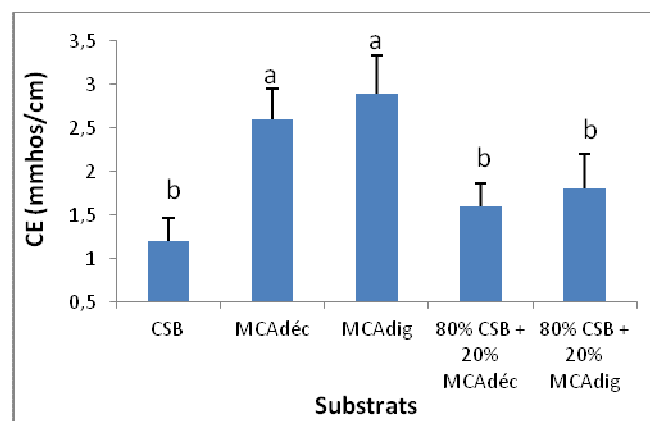
La CE peut constituer une indication sur la disponibilité des éléments minéraux dans le milieu de culture. La teneur élevée en sels affecte la croissance des végétaux en provoquant des brûlures aux racines et aux feuillages. À cet égard, il faut garder en mémoire que les plantes s'enracinent mieux dans un substrat contenant peu d'éléments nutritifs [12]. 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.

La salinité peut également se développer à partir de la minéralisation d'azote et de la production d'acides organiques [42]. Pour un compost, selon [15], la CE ne doit pas dépasser 4 mS/cm.

La salinité excessive du compost peut être à l'origine de sa phytotoxicité [42]. Les produits organiques testés ne contiennent pas de substances phénoliques qui peuvent entraver la germination des plants qui vont être produits sur ces substrats [4]. Pour le cas du MCA, la biométhanisation réduit davantage la salinité du matériau de départ (fientes avicoles) du fait que l'effluent considéré est connu par sa teneur élevée en sels.

Le niveau de salinité atteint demeure non néfaste si l'accumulation des sels lors de la fertigation est limitée. Par comparaison aux travaux antérieurs sur le compostage de la

biomasse forestière en Tunisie [4], la valeur moyenne de la CE est acceptable.



CSB: Compost Sylvicole Brut, MCA<sub>dec</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur), MCA<sub>dig</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

Les moyennes de chaque paramètre suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 5. Conductivité électrique (CE) de différents substrats testés

**Matière organique :** La teneur en MO est d'une importance fondamentale pour la fertilité des sols, du fait de ses effets physiques, chimiques et biologiques. Les fientes des poules pondeuses, d'après [29], présentent un taux de MO de l'ordre de 58 %.

La DA est à l'origine d'une réduction significative du taux de MO. Cette baisse de la teneur en MO du MCA explique celle observée pour le C<sub>org</sub> compte tenu de la relation de proportionnalité entre ces deux paramètres (Figures 6 et 7).

Les teneurs relevées de MO dans le cas des MCA sont moins élevées que celles au niveau des mélanges confectionnés ou du CSB seul (Figure 6). La dégradation de la MO des fientes avicoles pendant la DA explique ce résultat. Un degré de dégradation trop élevé des fientes avicoles, résultant d'une durée de digestion plus longue, risque de diminuer la valeur organique du MCA produit. Ce résultat est conforme avec celui dégagé par [1] qui confirme que le digestat est très pauvre en MO.

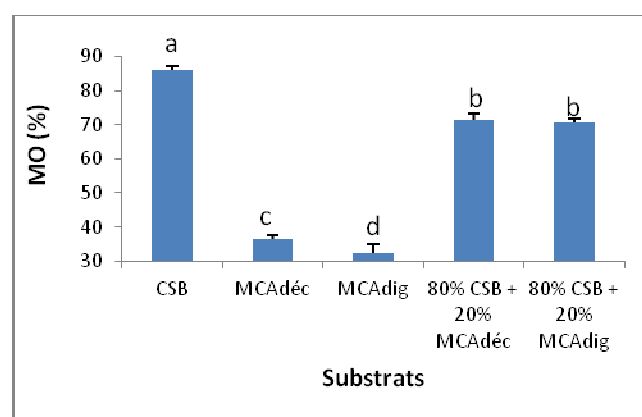
Le taux de MO au niveau des substrats confectionnés est donc inversement proportionnel au taux d'incorporation du MCA qui doit satisfaire certaines normes exigeant des teneurs minimales en MO.

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 notable suite à une diminution de la teneur en MO dans le produit. Elle est considérée par certains auteurs tels que [25] comme un paramètre de qualité et de maturité des composts. [33] discerne 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 rapportées par [15], le compost mûr doit avoir une teneur en MO < 50% (% MS). Pour un compost de qualité (de point de vue stabilité et maturité), la teneur en MO devrait être comprise entre 35 et 45 % (% MS). Selon ce critère, seuls les deux MCA sont considérés comme des produits mûrs et stables. L'ajout du CSB au MCA semble perdre la stabilité des substrats. Le mélange du MCA avec du CSB fait introduire des microorganismes à partir du CSB et ces derniers recommencent la dégradation de la MO, ce qui est responsable du manque de stabilité dans les substrats confectionnés [23].

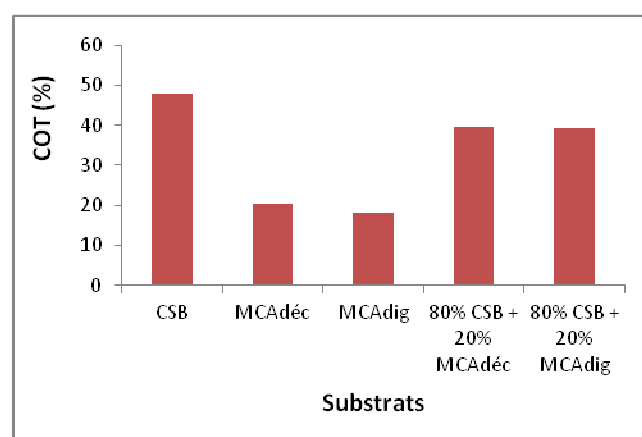
Par comparaison aux travaux antérieurs sur le compostage de la biomasse forestière en Tunisie [4], le taux moyen de MO du CSB testé demeure adéquat.



CSB: Compost Sylvicole Brut, MCA<sub>dec</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur), MCA<sub>dig</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

Les moyennes de chaque paramètre suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 6. Pourcentages relevés de matière organique



CSB: Compost Sylvicole Brut, MCA<sub>dec</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur), MCA<sub>dig</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).



Les moyennes de chaque paramètre suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

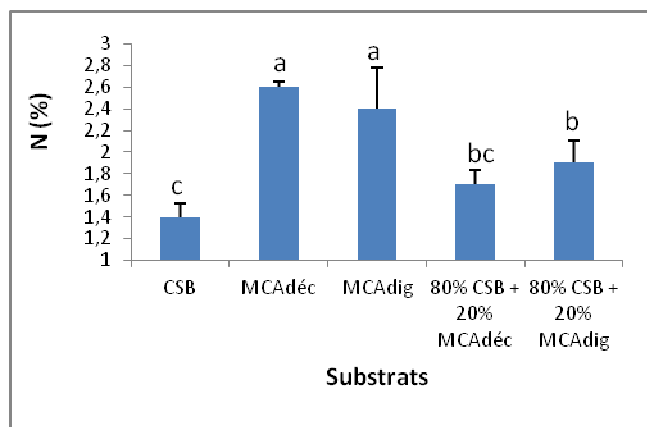
Figure 7. Pourcentages estimés du carbone organique total

**Teneur en azote :** Les teneurs élevées en azote total des MCA (Figure 8) sont dues à la richesse des déjections animales en général, et des fientes avicoles, en particulier, en azote [23]. Il y a une minéralisation importante de l'azote, lors de la DA, proportionnelle au taux de biodégradation du carbone [35].

Les teneurs en azote du CSB comme des MCA sont adéquates conformément aux normes citées par [45]. Selon ces dernières, un compost destiné à être utilisé en horticulture, doit avoir une teneur en azote supérieure à 1 % (% MS). Selon [16], la teneur en azote doit être comprise entre 0,92 et 2,76 %. Selon [45], pour la directive de la Communauté Européenne (CE), la valeur minimale imposée est de l'ordre de 0,6 % alors que la valeur maximale imposée par la norme NF U 44-051 est d'environ 2 % pour les supports de culture. Au delà d'une valeur de 2 %, le compost devrait être considéré comme un engrais organique [45]. Cette teneur relevée dépend du degré de maturité qui est apprécié par le rapport C/N.

Étant donné que les MCA possèdent des teneurs assez élevées qui dépassent, d'après [45], les teneurs acceptables relatives aux supports de culture, ces matériaux organiques ne peuvent pas être utilisés seuls comme supports de culture. Ils conviennent souvent à un affaiblissement des résistances mécaniques de la plante et à lui conférer une plus grande sensibilité à certaines maladies cryptogamiques [6]. Le recours au mélange du MCA avec le CSB permet d'enrichir davantage les substrats confectionnés en termes d'azote tout en respectant les normes établies dans ce cadre.

Par comparaison aux travaux antérieurs sur le compostage de la biomasse forestière en Tunisie [4], la teneur relevée d'azote du CSB est relativement faible par rapport aux résultats obtenus lors des autres travaux (teneur observée égale à 2 %).



CSB: Compost Sylvicole Brut, MCA<sub>dec</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur), MCA<sub>dig</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

Les moyennes de chaque paramètre suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 8. Pourcentages relevés d'azote

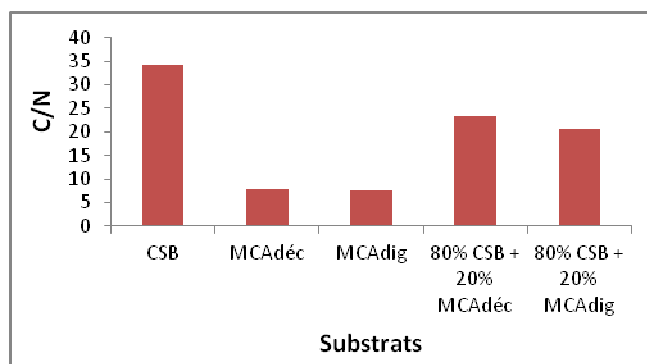
**Rapport C/N :** Le rapport C/N est fréquemment utilisé pour évaluer le processus de minéralisation de la MO [7] et comme indicateur de maturité des composts [25]. Selon [45], ce rapport varie largement selon l'origine des déchets compostés et il est influencé directement par la teneur relative en azote du substrat, alors que la détermination du C/N d'un compost n'est pas suffisante pour déterminer sa maturité [38]. Le rapport C/N décroît constamment au cours du compostage pour se stabiliser vers 10 (8 à 15) dans un compost mûr [33]. Ce paramètre présente néanmoins un défaut majeur, en raison du manque de valeurs de référence trop précises. [25] suggère un rapport inférieur à 12 qui reflète un degré de maturité du compost. [42] a proposé un rapport C/N idéal s'étendant de 12 à 25.

Les faibles rapports C/N des MCA (Figure 9) peuvent s'expliquer par le fait que la minéralisation des composts d'origine animale est plus rapide que celle d'origine végétale ou CSB (dégradation difficile des polymères : Lignine, cellulose, ...). En plus, le digestat, et entre autres, le méthacompost est très pauvre en MO et plus riche en azote [1].

Les rapports C/N relevés (Figure 9) dépendent du type de produit organique utilisé et de son volume employé.

Selon [27], 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. De ce fait, les MCA, comme c'est déjà indiqué précédemment, ne conviennent pas à être utilisés comme substrats de culture, mais au contraire ils peuvent être mélangés avec d'autres composantes dans la confection des substrats de croissance tel que le CSB à C/N élevé. Des substances nouvellement formées (gaz carbonique, acides organiques aliphatiques, azote ammoniacal ou nitrique en trop grandes quantités) peuvent exercer des effets phytotoxiques sur les racines des plants produits sur ces substrats [27]. L'emploi de MO à C/N élevé doit être préféré encore dans les supports de culture, car la décomposition lente perturbera moins le milieu physique. 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.





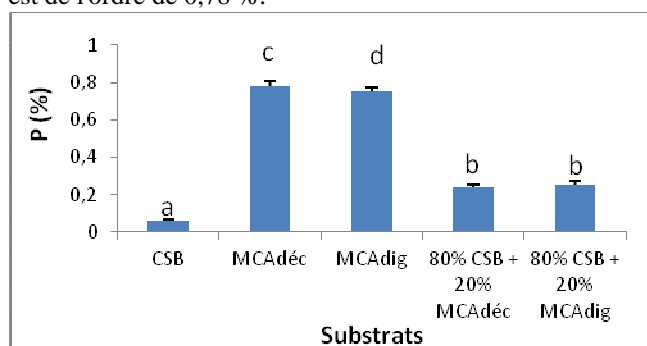
CSB: Compost Sylvicole Brut, MCA<sub>dec</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur), MCA<sub>dig</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

Les moyennes de chaque paramètre suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 9. Effet de la composition du substrat sur les rapports C/N relevés

### Teneurs en éléments minéraux :

**Phosphore :** En général, la teneur en P dans le compost varie de 0,7 à 0,9 (% MS) dont 50 à 60 % sont assimilables. Les valeurs relevées pour les deux MCA testés répondent à cette fourchette, mais ceci n'est pas vrai pour le cas du CSB. L'introduction du MCA, même en faible proportion, permet d'améliorer davantage cette teneur par rapport à celle du CSB seul (Figure 10). Les résultats des analyses statistiques montrent une faible différence relevée entre les deux teneurs en P chez MCA<sub>dig</sub> et MCA<sub>dec</sub>, mais la différence générale entre les divers niveaux considérés est significative. La teneur moyenne en P du MCA<sub>dec</sub> produit est de l'ordre de 0,78 %.



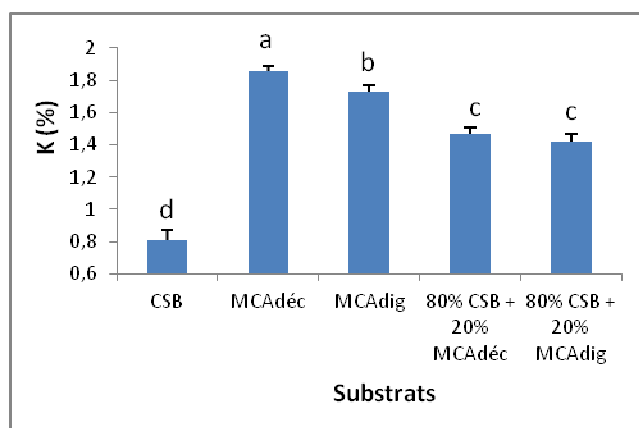
CSB: Compost Sylvicole Brut, MCA<sub>dec</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur), MCA<sub>dig</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

Les moyennes de chaque paramètre suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 10. Pourcentages relevés de phosphore

**Potassium :** Le MCA est un matériau hautement plus riche en K que le CSB (Figure 11). La teneur moyenne en

K du MCA<sub>dec</sub> produit est de l'ordre de 1,86 %. Par ailleurs, il y a une différence significative entre les teneurs relevées en K pour les deux MCA étudiés. Un excès de K peut gêner l'absorption du Ca et du Mg. En effet, il ya un antagonisme entre le Ca et le K. On vient de remarquer que les mélanges confectionnés, et contrairement aux substrats purs, pour le cas des teneurs en P comme pour K ne présentent pas des différences significatives.

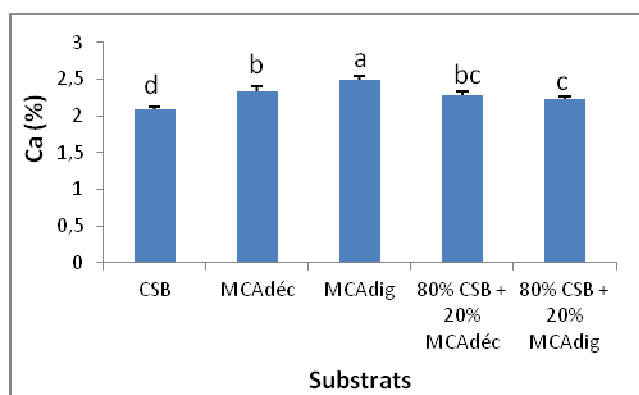


CSB: Compost Sylvicole Brut, MCA<sub>dec</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur), MCA<sub>dig</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

Les moyennes de chaque paramètre suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 11. Pourcentages relevés de potassium

**Calcium :** D'après la Figure 12, le MCA<sub>dig</sub> produit présente une teneur moyenne en Ca très élevée de l'ordre de 2,5 %. Cette valeur est généralement supérieure à la teneur du fumier de ferme. Le Ca rend le milieu favorable aux micro-organismes du sol, agents de la décomposition des MO, de l'humification, de la minéralisation et de la fixation symbiotique [11]. Il est conseillé donc d'utiliser le MCA<sub>dig</sub> parce qu'il est logiquement plus riche en Ca.



CSB: Compost Sylvicole Brut, MCA<sub>dec</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Décanteur), MCA<sub>dig</sub>: Méthacompost Avicole Affiné (Sortie Digesteur).

Les moyennes de chaque paramètre suivies de lettres différentes indiquent la présence de différences significatives entre les substrats au seuil de 5% selon le test de Duncan.

Figure 12. Pourcentages relevés de calcium

Tenant compte de la valeur fertilisante dominante 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 intéressante et pourrait déboucher sur la production et l'utilisation des méthacomposts épuisés en pépinière. L'extrait du méthacompost pourrait être employé comme fertilisant en pépinière.

La maîtrise de la qualité des co-produits de l'extraction des méthacomposts pour une meilleure valorisation en pépinière maraîchère hors sol mérite d'être entreprise dans l'avenir.

La DA est la filière bioénergétique aux perspectives les plus prometteuses. Elle permet de toucher un revenu additionnel par la vente du digestat comme matière fertilisante, s'il n'est pas utilisé sur la ferme [40]. Elle permet de stabiliser les déchets organiques à moindre coût, ce qui donne une valeur économique à la production de déchets organiques, de compenser les coûts nécessaires à leur traitement et de donner une rentabilité économique à la production de déchets [37].

### 3. Conclusion

Les déjections animales sont particulièrement recherchées quand elles sont produites en quantités importantes et régulières et surtout lorsqu'elles sont traitées biologiquement (par biométhanisation et/ou par compostage) avant utilisation.

L'utilisation agronomique des résidus de la biométhanisation s'intègre bien dans la tendance actuelle vers les pratiques agrobiologiques, compte tenu de la réduction importante de la charge polluante des déjections après traitement biologique.

Les pépinières forestières installées ces dernières années s'orientent de plus en plus vers la substitution du terreau forestier par les produits issus des traitements biologiques de la biomasse végétale (compost sylvicole) et/ou animale (méthacompost avicole). Cette solution intéressante présente certaines limites concernant les qualités physique et chimique. La présente étude s'est proposée une optimisation physico-chimique des substrats issus du mélange de deux produits organiques en question.

Au terme de ce travail, la synthèse des résultats est la suivante :

Le CSB évalué, à granulométrie pratiquement grossière, ne peut pas être considéré de point de vue physique comme

un bon substrat de culture, à cause de sa porosité de rétention relativement insuffisante (substrat généralement aérateur), ce qui justifie son mélange, selon le ratio convenable, avec le MCA (substrat rétenteur d'eau).

L'incorporation des méthacomposts considérés (MCA<sub>dig</sub> et MCA<sub>déc</sub>) avec le CSB s'est avérée positive dans des proportions bien précises et cette orientation permet un bon équilibre entre les porosités d'aération et de rétention, surtout à raison de 20 % pour chacun.

Mais, il ne faut pas oublier que ces critères peuvent être modifiés en cours de culture, d'abord par la colonisation des racines, puis par une modification des propriétés structurales au cours du temps.

En plus de la correction physique, l'utilisation du CSB en mélange avec le MCA s'est avérée très encourageante en termes de richesse initiale en éléments minéraux.

Le CSB, considéré comme substrat de référence en pépinière forestière, n'est pas trop riche en certains éléments par opposition au MCA qui est considéré comme source de différents éléments minéraux.

La richesse initiale en éléments minéraux du MCA pourrait constituer un bon indice pour réduire le nombre de fertigations adoptées lorsque le CSB est utilisé seul à l'état pur. D'où, le double intérêt du MCA comme substrat rétenteur d'eau (rôle physique) et riche en éléments fertilisants (rôle chimique). Cependant, il reste à évaluer les effets de ces différents substrats sur la croissance et la physiologie des plants résineux et feuillus en conditions de pépinière forestière.

Cette richesse initiale du substrat en éléments minéraux pourrait être facilement lessivée pendant la phase de germination et pendant les premières phases de croissance. Il faut contrôler donc les apports de fertilisants selon les stades et les besoins des plants.

### Remerciements

Ce travail n'a été possible que grâce à la contribution de l'Institut d'Olivier de Sousse, Tunisie, qui a mis à notre disposition son laboratoire des Systèmes de Productions Oléicoles et Fruitières pour la réalisation de différentes analyses physico-chimiques, sans oublier la Pépinière Forestière Moderne de Chott-Mariem (Sousse) qui a contribué par ses plates-formes de compostage et de culture pour la mise en place des expérimentations agronomiques hors sol (faisant ultérieurement l'objet d'un autre article). La participation de la Société Avicole Frères Mhiri, localisée à Hammam Sousse (Sousse), est aussi fortement appréciée (mise à notre disposition de l'installation de biométhanisation industrielle avicole disponible et des digestats produits).

Nous tenons également à remercier les reviewers anonymes pour leurs commentaires constructifs.

## Références bibliographiques

- [1] ADEME, 2006. Les énergies renouvelables en agriculture : L'intérêt agronomique du digestat issu de la méthanisation. Fiche Technique n°3 élaborée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Mission « Énergie » de la Chambre d'Agriculture du Doubs, 2 p.
- [2] ALCOR & AXENNE, 2003. Étude stratégique pour le développement des énergies renouvelables en Tunisie-Bilan des réalisations. Document élaboré par les Bureaux d'Études ALCOR et AXENNE et publié dans le rapport final de l'Agence Nationale des Énergies Renouvelables (ANER), p. 148-157.
- [3] Amand G., Bonnouvrier A., Chevalier D., Dezat E., Nicolas C., Ponchant P., 2008. Les consommations d'énergie dans les bâtiments avicoles. Quelques repères sur les consommations d'énergie et propositions de pistes d'amélioration. Édition « ITAVI », n°1, 24 p.
- [4] Ammari Y, Lamhamedi M.S, Akrimi N, Zine el abidine A. 2003. Compostage de la biomasse forestière et son utilisation comme substrat de croissance pour la production de plants en pépinières forestières modernes. Revue de l'INAT, vol. XVIII, p. 99-119.
- [5] Ammari Y., Lamhamedi M.S. Zine El Abidine A., Akrimi N., 2007. Production et croissance des plants résineux dans différents substrats à base de compost dans une pépinière forestière moderne en Tunisie. Revue Forestière Française. LIX 4, p. 339-358.
- [6] Ameziane El Hassani T., Persoons E., 1994. Agronomie moderne : Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. Édition « Hatier-AUPELF. UREF », 544 p.
- [7] 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, 280 p.
- [8] Angelidaki I., Ellegaard L., 2003. Co-digestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. Appl. Biochem. Biotech 109, p. 95-105.
- [9] Baumann R., 2010. From digestate to organic fertilizer. Example of a multi-stage digestate conditioning. International Symposium: Progress in treatment of manure and digestate, 24-25 february 2010, Heiden, Germany.
- [10] Bernal M.P., Paredes C., Sánchez-Monedero M.A., Cegarra J., 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. Bioresource Technology 63, p. 91-99.
- [11] Bouhaouach H., Culot M., Kouki K., 2009. Compostage et valorisation des déchets oasiens pour l'amélioration des sols et de la productivité. Symposium International « Agriculture Durable en Région Méditerranéenne (AGDUMED), 14-16 mai 2009, Rabat, p. 235-240.
- [12] Comtois M., Légaré M., 2004. La fertilisation des plantes ligneuses cultivées en contenant. Programme Horti-2002, Direction de l'Innovation Scientifique et Technologique, 57 p.
- [13] CVPQ, 1993. Pépinières, Culture en conteneurs, Substrats. Document technique, Conseil des Productions Végétales du Québec, 19 p.
- [14] Fruteau H., Membrez Y., 2004. Réalisation d'un référentiel technico-économique des unités de méthanisation de produits organiques agricoles et non agricoles à petite échelle en Europe (Lots 1 et 2). EREP SA, 11 p.
- [15] 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.
- [16] 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, p. 507-517.
- [17] Gauthier F., Gagnon S., Dansereau B., 1998. Incorporation de résidus organiques dans un substrat tourbeux pour la production d'impatiens et de géraniums. Can. J. Plant Sci. 78, p. 131-138.
- [18] Gomez X., Cueto M.J., Garcia A.I., Moran A., 2005. Evaluation of digestate stability from anaerobic process by thermogravimetric analysis. Thermochimica Acta 426, p. 179-184.
- [19] 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 Technology 96, p. 1584-1591.
- [20] Hoitink H.A.J., Stone A.G., Han D.Y., 1997. Suppression of plant diseases by composts. HortScience 32 (2), p. 184-187.
- [21] ISO, 1994. Qualité du sol : Détermination du pH et de la CE spécifique. International Standardisation Organisation (ISO), 4 p.
- [22] Kahn B.A., Hyde J.K., Cole J.C., Stoffella P.J., Graetz D.A., 2005. Replacement of a peat-lite medium with compost for Cauliflower transplant production. Compost Science & Utilization 13, p. 175-179.
- [23] 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), 158 p.
- [24] 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 la qualité des plants (*Pinus pinea*, *Pinus halepensis*, *Cupressus sempervirens* et *Quercus suber*) élevés en conteneurs. Rapport technique : Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie, PAMPEV, 112 p.
- [25] 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, p. 15-21.
- [26] Leclerc B., 2001. Guide des matières organiques : Fumier de bovin : p. 204-206- Fumier de poulet de chair : p. 219-221- Fiente de poule pondeuse : p. 225-227- Lisier de bovin : p. 228-230- Lisier de poule pondeuse : p. 238-240. Guide Technique de l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB), 2ème édition.
- [27] Lemaire F., Dartigues A., Rivière L.M., Charpentier S., 1989. Cultures en pots et conteneurs : Principes agronomiques et applications. INRA, PHM. Revue Horticole, Paris Linoges, 181 p.
- [28] Letard, M., Erard, P. et Jean Equin, B., 1994. Maîtrise de l'irrigation fertilisante de la tomate sous serre et abris. Ed CTIFL, Paris, 120 p.
- [29] Levasseur P., et Aubert Cl., 2006. Contexte, atouts et faiblesses des effluents porcins et avicoles destinés à être exportés. École Supérieure d'Agronomie (ESA) d'Angers 29, 9 p.
- [30] Mallard P., Rogeau D., Gabrielle B., Vignoles M., Sablayrolles C., Le Corff V., Carrère M., Renou S., Vial E., Muller O., Pierre N., Coppin Y., 2005. Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets. Rapport final de l'Étude entre l'ADEME et le Groupement CEMAGREF-INRA-CREED-Anjou Recherche-Ecobilan-Orval, 131 p.
- [31] Morard P., 1995. Les cultures végétales hors sol. Édition Publications Agricoles AGEN, Paris, p. 9-11.
- [32] Morel P., Poncet P., Rivière L.M., 2000. Les supports de culture horticoles : Les matériaux complémentaires et alternatifs à la tourbe. Éditions INRA, Paris, 84 p.
- [33] Mustin M., 1987. Le compost. Gestion de la matière organique. Édition François Dubusc, Paris, 954 p.
- [34] 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 5, p. 523-529.
- [35] Pouech Ph., 2008. Principales caractéristiques des digestats. Journée Technique Nationale « Réussir un projet de méthanisation

- [36] associant des déchets ménagers agricoles et industriels», 7 octobre 2008, ADEME, France, 6 p.
- [37] Saidi A., Abada B., 2007. La biométhanisation : Une solution pour un développement durable. *Revue des Énergies Renouvelables*, p. 31-35.
- [38] Schievano A., Pognani M., D'Imporzano G, Adani F., 2008. Predicting anaerobic biogasification potential of ingestates and digestates of a full-scale biogas plant using chemical and biological parameters. *Bioresource Technology* 99, p. 8112-8117.
- [39] Serra-wittling C., Houot S., Barriuso E., 1995. Soil enzymatic reponse to addition of municipal solid-waste compost. *Biol. Fertil. Soils*, 20, p. 226-236.
- [40] Soumaré M., Demeyer A., Tack FM.G, Verloo M.G, 2002. Chemical characteristics of Malian and Belgian solid waste composts. *Bioresource Technology* 81, 97-101.
- [41] Sylvestre B., 2003. Biogaz de fermes d'élevage et de bâtiments d'exploitation. *Environmental Technology & Management, Hogeschool Brabant, Breda, Pays-Bas*, 30 p.
- [42] Tambone F., Genevini P., D'Imporzano G., Adani F., 2009. Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. *Bioresource Technology* 100, p. 3140-3142.
- [43] Tiquia S.M., 2010. Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition. *Chemosphere* 79, p. 506-512.
- [44] Tou I., Igoud S., Touzi A., 2001. Production de Biométhane à partir des Déjections Animales. *Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse*, p. 103-108.
- [45] Van Den Berg L., 1982. Anaerobic digestion of wastes. *Conservation & Recycling* 1, p. 5-14.
- [46] 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.
- [47] Zuhang H., Musard M., Dumoulin J., THicoipé 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, 215 p.