

Valorisation agronomique hors sol de la biométhanisation industrielle avicole en Tunisie

Youssef M'Sadak* et Leila Tayachi

Département du Génie des Systèmes Horticoles et du Milieu Naturel
Université de Sousse, Institut Supérieur Agronomique de Chott-Mariem,
B.P. N°47, 4042 Sousse, Tunisie

(reçu le 13 Juin 2013 – accepté le 30 Septembre 2014)

Résumé - Cette étude s'est attachée à la substitution partielle du Compost Sylvicole Brut (CSB), produit localement, par le méthacompost avicole (MCA) récupéré à la sortie du décanteur (MCAA) ou à la sortie du digesteur (MCAA') d'une unité de biométhanisation industrielle. A cet égard, des tests de porosité et des analyses chimiques de substrats confectionnés ont été accomplis. Le suivi a porté également sur la germination et la croissance des plants d'*Acacia cyanophylla*. Les principaux résultats acquis sont: - Sur le plan physique, le CSB ne peut pas être considéré comme bon substrat de culture, à cause de sa porosité de rétention (Pr) relativement insuffisante. 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 favorisant un meilleur 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. - Il n'y a pas de différences significatives entre le MCAA et le MCAA' de point de vue physique. Sur le plan composition chimique, le MCAA a présenté une légère supériorité en éléments minéraux (N, P, K, ...). - L'incorporation du méthacompost avicole avec le CSB a un effet positif remarquable sur la germination, et par suite, sur la croissance des plants, en termes de hauteur et de diamètre.

Abstract - This study examined the partial substitution of crude forestry compost (CSB), locally produced by methacompost poultry (MCA) recovered at the outlet of the decanter (MCAA) or at the outlet of the digester (MCAA') of industrial biomethanation unit. In this regard, porosity tests and chemical analyzes of substrates prepared have been fulfilled. The follow-up has also focused on the germination and seedling growth of *Acacia cyanophylla*. The main results acquired are: - On the physical, the CSB cannot be considered as a good a growth substrate because of its porosity retention (Pr) which is relatively low. It is an aerator substrate, which justifies its mixture, in the suitable ratio, with MCA which are water retention substrates. - The incorporation of considered MCA was positive in precise proportions to promote a better balance between aeration and retention porosities. - From a chemical standpoint, the use of CSB mixed with MCA was very encouraging in terms of initial wealth in minerals of the mixture. - Physically, there are no significant differences between the MCAA and MCAA'. Chemically, the MCAA presented a slight superiority of mineral elements (N, P, K ...). - The incorporation of poultry methacompost with the CSB has a remarkable positive effect on germination, and consequently on the growth of plants in terms of height and diameter.

Mots clés: Pépinière forestière hors sol - Compost sylvicole - Méthacompost avicole - Caractérisation physico-chimique - Plants d'*Acacia cyanophylla* - Comportement agronomique.

* msadak.youssef@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

La bio méthanisation est l'une des technologies permettant le traitement de la fraction organique des déchets. Elle peut transformer un problème des déchets en une source de richesses [1, 2].

Il existe, en effet, plusieurs opportunités de recyclage de déchets organiques, notamment pour la production d'énergie et la fertilisation, de manière à réduire la quantité de déchets organiques ensevelis et à diversifier les sources d'énergie de substitution.

Les déjections animales sont spécialement intéressantes à exploiter quand elles sont produites en quantités importantes et régulières [3] et surtout lorsqu'elles sont traitées par bio méthanisation avant utilisation [4-6].

La fermentation méthanique est, aujourd'hui, la filière bioénergétique aux perspectives les plus prometteuses [7, 8]. Son application industrielle, après les progrès des dernières années de recherches, commence à devenir une réalité. En effet, les techniques disponibles sont d'ores et déjà suffisamment performantes pour rendre les systèmes proposés économiquement acceptables [9].

La dégradation de la matière organique (MO) par voie anaérobie est de plus en plus reconnue comme méthode fondamentale d'une technologie avancée permettant la protection de l'environnement et la conservation des ressources [10-12]. Le bon fonctionnement (environnemental et énergétique) de ce type de procédé est largement conditionné par les conditions physico-chimiques (nature, pH, MS, ...) des substrats mis en fermentation.

Le traitement biologique anaérobie par bio méthanisation aboutit à la formation d'un produit plus ou moins liquide, appelé digestat [13], constitué de la fraction peu ou difficilement biodégradable du déchet entrant [14]. Ce produit est mal connu et peu étudié dans la littérature [15]. Dans un projet de bio méthanisation, le digestat est à considérer comme un produit à valoriser au même titre que l'énergie issue du biogaz [11, 16, 17].

Le présent travail concerne entièrement une évaluation des potentialités de valorisation agronomique hors sol des méthacomposts avicoles produits à l'échelle du digesteur pilote industriel (alimenté par des fientes avicoles fraîches après leur dilution) installé à Hammam Sousse (Tunisie).

L'emploi agronomique des digestats ou résidus (solide et liquide) de la bio méthanisation 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.

L'utilisation, surtout de la fraction solide du digestat, appelée méthacompost, comme substitut partiel du compost sylvicole brut, 'CSB', considéré comme substrat de référence pour la production des plants forestiers, pourrait constituer une alternative intéressante pour améliorer notamment sa qualité chimique, et par conséquent, la qualité des plants forestiers produits.

Dans cette optique, le travail accompli est orienté particulièrement vers la mise au point des substrats de croissance à base de mélange de compost et de méthacompost avicole, 'MCA', adéquats pour la production hors sol des plants forestiers.

De ce fait, des caractérisations directe et indirecte des substrats confectionnés ont été respectivement entreprises, visant essentiellement l'appréciation de leur comportement

physico-chimique et des comportements germinatif (germination des semences) et végétatif (croissances en hauteur et en diamètre, ratio de robustesse) des plants d'Acacia cyanophylla installés, d'une part, sur le CSB seul à l'état pur, et d'autre part, sur le CSB associé avec le MCA dans ses deux états, à savoir la phase solide récupérée du digestat à la sortie du décanteur, 'MCAA' et le digestat récupéré à la sortie du digesteur après son séjour interne prolongé, 'MCAA'' suivant le même ratio, à raison de 20 % dans chaque mélange.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Système expérimental

2.1.1 Descriptif technique du digesteur étudié

Il s'agit d'un digesteur industriel pilote de forme cylindrique (Fig. 1), installé dans une ferme avicole à Hammam Sousse relevant du gouvernorat de Sousse (Tunisie), depuis l'année 2000, d'une capacité utile de 300 m³, alimenté en continu quotidiennement par 10 m³ de substrat composé d'environ 1/3 de fientes avicoles et 2/3 d'eau provenant lors du raclage des poulaillers avec l'effluent sortant décanté (solution aqueuse ou surnageant). L'alimentation en fientes avicoles étant mécanique et le raclage des poulaillers permet une bonne dilution du substrat et un pompage facile [18].



Fig.1: Vue générale de l'installation intégrale de bio méthanisation industrielle adoptée

Ce digesteur industriel est de type digesteur de contact anaérobie à cellules immobilisées (à biomasse fixée). Il est composé d'un milieu réactionnel rempli d'un solide (lit fixe) sur lequel vont se fixer les bactéries. Le garnissage est constitué d'un support inerte de nature (6000 briques de 12). Un tel digesteur fonctionne avec un flux ascendant/descendant.

Suivant ce procédé, l'affluent s'écoule vers le haut ou vers le bas (selon sa teneur en solides) à travers le digesteur contenant les briques de 12 qui retiennent les microorganismes anaérobies et sur lesquelles ils accroissent.

Signalons qu'il est capable de traiter environ quatre (04) tonnes par jour. La capacité de production journalière de l'installation est estimée à 200 m³ de biogaz.

L'installation globale de production et de valorisation de biogaz (Fig. 1), située à proximité des poulaillers, est constituée de:

- Un bassin de collecte pour le mélange des fientes avec les eaux, de forme circulaire avec 4 m de diamètre et 24 m³ de capacité, et il est relié au bassin de filtration par un canal qui permet l'écoulement libre et spontané du mélange liquide.

- Un bassin de filtration de forme carrée de 4 m³ de capacité, permet la séparation du mélange et d'autres éléments comme les plumes, le sable, etc. Ce bassin est aussi caractérisé par l'écoulement libre et spontané du liquide en question.

- Un bassin de régulation et de dosage pour la régulation du pH, de forme circulaire, avec un diamètre de 4 m. Quant à sa capacité, elle est de 40 m³.

Par la suite, les fientes diluées vont être pompées vers le digesteur. Le digesteur, constituant le cœur du dispositif de bio méthanisation, est formé d'un toit ayant la configuration d'un cône pour faciliter le dégagement des gaz. Etant de forme cylindrique, il a 8 m de diamètre et 6 m de hauteur.

Le gazomètre est constitué d'une cloche de 20 m³ de capacité, posée dans un bassin de 7 m de diamètre rempli d'eau. Cette cloche se déplace à l'aide d'un rail selon la quantité de biogaz stockée, elle possède aussi un dispositif permettant le réglage de pression du biogaz.

Deux colonnes d'épuration du biogaz produit sont installées entre le digesteur et le gazomètre. La capacité de chaque colonne est de 0,9 m³. L'épuration ou désulfuration est obtenue au moyen de copeaux d'hématite de fer.

2.1.2 Post-traitement du digestat avicole produit

Les fientes digérées, produites dans le digesteur, traversent trois bassins différents (Fig. 1): Un premier bassin recevant le substrat digéré pour un faible temps de séjour (appelé bassin des fientes digérées) avant de séjourner dans le second bassin, appelé bassin de décantation ou décanteur.

A partir de ce dernier, les boues des fientes décantées seront séchées et transformées en méthacompost. Quant à l'eau surnageant (jus de process) le bassin de décantation, elle passe dans le troisième bassin pour servir au raclage des fientes fraîches des poulaillers.

Il convient de noter que parallèlement à chaque opération d'alimentation par de nouvelles fientes, une même quantité de fientes traitées s'évacue à partir du trop plein vers le bassin de collecte des fientes digérées.

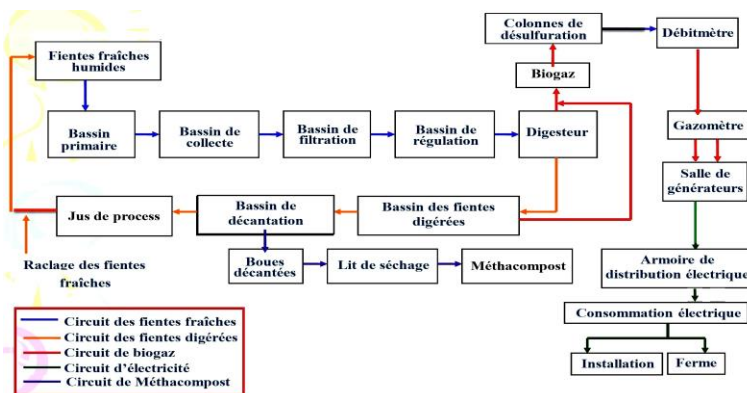


Fig. 2: Schéma synoptique de différents circuits de la bio méthanisation industrielle avicole

2.2 Matériel végétal

Une espèce forestière feuillue à croissance rapide, *Acacia cyanophylla*, a été utilisée pour étudier la réponse végétale vis-à-vis de différents substrats de croissance testés. Les semences de cette espèce ont été fournies par la Direction Générale des Forêts (DGF), et récoltées à partir d'arbustes situés dans la région d'Enfidha, gouvernorat de Sousse.

2.3 Substrats de culture

Les substrats confectionnés, objet de cette étude, sont obtenus suite au mélange d'un compost pur d'origine végétale avec un méthacompost d'origine animale.

La biomasse ligneuse verte, sous forme de branches d'*Acacia cyanophylla*, a été utilisée pour produire un compost avec les caractéristiques requises pour l'élevage de plants forestiers en pépinière moderne [19, 20]. Le compost d'*Acacia* produit a constitué la matrice de base dans la préparation des substrats de culture testés.

Les substrats purs sont les suivants :

- Compost Sylvicole Brut (CSB), produit dans la pépinière forestière moderne de Chott-Mariem, Sousse. Il est issu des branches d'*Acacia cyanophylla* broyées successivement par un broyeur simple à couteaux et par un broyeur simple à marteaux équipé d'une grille de calibrage de maille 30 mm.

Dans l'ensemble, la taille dominante des particules compostées est comprise entre 5 et 25 mm. Cette dimension est la suite 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.

- Méthacompost Avicole (MCA), résidu solide issu de l'unité de biométhanisation industrielle à Hammam Sousse dans ses deux états, à savoir à la sortie du décanteur 'MCAA' et à la sortie du digesteur 'MCAA''. Les MCA sont obtenus, d'une part, à partir de la récupération mensuelle de la fraction décantée au niveau du décanteur et son séchage, et d'autre part, à partir de la vidange semestrielle de la fraction digérée au niveau du digesteur et son séchage.

A partir de ces trois produits purs, on a réalisé huit mélanges, tout en substituant partiellement le CSB par l'un ou l'autre des MCA étudiés (% volume). Les mélanges testés sont regroupés en deux catégories présentées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1: Identification et composition des mélanges confectionnés

Mélanges CSB + MCAA			Mélanges CSB + MCAA'		
Substrat	%CSB	%MCAA	Substrat	%CSB	%MCAA'
S1	80	20	S5	80	20
S2	70	30	S6	70	30
S3	60	40	S7	60	40
S4	50	50	S8	50	50

Les substrats mis à l'évaluation directe (caractérisation physico-chimique) sont au nombre de cinq: trois substrats purs considérés (CSB, MCAA, MCAA') et deux meilleurs mélanges (M1, M2) confectionnés à partir de trois constituants purs considérés.

Les substrats expérimentés indirectement (caractérisation agronomique) sont limités au nombre de trois:

- SA- Substrat standard CSB (témoin)
- SB- Mélange 80 % CSB + 20 % MCAA (M1)
- SC- Mélange 80 % CSB + 20 % MCAA' (M2)

L'évaluation indirecte s'est avérée nécessaire, afin de mettre au point un substrat de culture permettant aux plants des conditions optimales de croissance et une bonne survie ultérieure en site de reboisement.

2.4 Evaluations physico-chimiques des substrats étudiés

2.4.1 Appréciation de la qualité physique

Le test standard de porosité [21] permet d'estimer les trois porosités ci-après et de renseigner ainsi sur le comportement physique des substrats de culture.

- 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 formules utilisées pour calculer les trois porosités et les normes adoptées dans le contexte tunisien sont présentées ci-après.

$$Pt (\%) = \left(\frac{\text{volume versé}}{\text{volume total}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$Pa (\%) = \left(\frac{\text{volume récupéré}}{\text{volume total}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$Pr (\%) = \left(\frac{\text{volume versé} - \text{volume récupéré}}{\text{volume total}} \right) \times 100 = Pt - Pa \quad (3)$$

Les conditions tunisiennes exigent les proportions de porosité suivantes: $Pt \geq 50 \%$, $Pa \geq 20 \%$ et $Pr \geq 30 \%$. Ces règles à respecter ont été inspirées des normes canadiennes [21] 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 et 8 mélanges (4 ratios \times 2) = 11 substrats de culture mis à l'essai par le test standard de porosité, réalisé sur terrain.

Il convient de noter que chaque test élémentaire de porosité a été réalisé avec trois répétitions. Chaque répétition fait appel à 3 gobelets, soit 9 gobelets par test.

2.4.2 Caractérisation chimique

L'évaluation chimique s'est intéressée particulièrement aux paramètres suivants: pH, CE, MO, N, C/N, P, K et Ca. Elle a concerné cinq substrats, dont les trois produits purs considérés et les deux meilleurs mélanges de point de vue porosité parmi les huit mélanges étudiés.

- pH

Le pH se manifeste par une modification induite par le substrat lors de la percolation de la solution nutritive. Un support peut, en effet, relâcher des ions (H^+) qui abaissent le pH ou des ions (OH^-) qui l'augmentent. Quand le pH reste dans les limites acceptables et compatibles avec l'activité des racines (pH = 6.3), il n'y a pas excessivement de

problèmes [22]. 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 [19]. Le pH est mesuré par un pH-mètre sur une suspension plus ou moins diluée (4 g de substrat dans 100 ml d'eau distillée) agitée pendant une heure.

- Salinité

Lorsque la teneur en sels est trop élevée, la croissance des végétaux est affectée. L'eau et les éléments minéraux sont moins absorbés par le système racinaire. Il peut même résulter des brûlures aux racines et au feuillage.

La détermination de la salinité est basée sur le fait que la conductivité électrique, 'CE' d'une solution est proportionnelle à sa concentration en sels solubles:

$$S \text{ (g/l)} = 0.7 \times \text{CE (mmhos/cm)} \quad (4)$$

La CE optimale de substrats se situe entre 1.5 et 2.25 mmhos/cm et ne doit pas excéder 2.5 à 3 mmhos/cm, selon le rapport de dilution 1/2. Si elle est inférieure à 1,5, le niveau de fertilité peut être trop bas [21].

- Matière organique

Le pourcentage de matière organique, 'MO' des substrats testés est déterminé par la méthode de calcination qui consiste à mettre les échantillons dans une étuve (105 °C) pendant 24 heures, puis dans un four à moufle (550 °C) pendant 6 heures. Pour le calcul de ce paramètre, on a utilisé la formule suivante:

$$\text{MO}(\%) = \frac{P(105^\circ) - P(550^\circ\text{C})}{P(550^\circ\text{C})} \times 100 \quad (5)$$

- Azote

L'azote (N) est déterminé par la méthode de Kjeldahl. Les teneurs N dans le compost, varient généralement de 0.6 à 1.3 % de la masse de la matière sèche (MS) et dont 5 à 20 % sont directement assimilables.

- Rapport C/N

Le rapport C/N reste le paramètre le plus significatif de la cinétique de minéralisation. Il affecte en particulier la disponibilité de l'azote. La matière organique MO, sous l'action des micro-organismes, se décompose pour donner de l'humus. Ces derniers utilisent un kg d'azote pour chaque 30 kg de carbone [21].

Le taux de carbone organique total et le rapport C/N sont relatés ci-après.

$$\text{COT}(\%) = (\text{MO}(\%) / 1.8) \times 100 \quad (6)$$

$$\text{C} / \text{N} = \text{COT}(\%) / \text{N}(\%) \quad (7)$$

- Phosphore

La teneur en phosphore total (P) dans le compost varie, en général, de 0.7 à 0.9 de la masse de la MS, et dont 50 à 60 % sont assimilables. Le dosage de P est effectué par spectrométrie d'absorption atomique.

- Potassium

Un excès de potassium (K) peut gêner l'absorption du calcium et du magnésium. En effet, il y a un antagonisme entre le calcium et le potassium. Sa teneur est déterminée suivant la méthode de dosage par spectrophotométrie à flamme.

- Calcium

Le calcium (Ca) stimule la transpiration et favorise la croissance des jeunes racines. Plus un substrat est riche en calcium, plus le système racinaire est intact. Sa teneur peut être déterminée selon la méthode de dosage par spectrophotométrie à flamme.

2.5 Suivis agronomiques des plants installés

2.5.1 Biotest de germination sur les légumineuses

Le but du biotest est d'évaluer la maturité du méthacompost, de prévoir l'existence éventuelle de quelques éléments phytotoxiques, tout en mettant en considération la photosensibilité des semences des plantes-tests [23]. Pour l'appréciation de la maturité du CSB, on a utilisé deux légumineuses: haricot et pois chiche. L'haricot traduit la phytotoxicité par un jaunissement des feuilles et une croissance déprimée, voire nulle. Le pois-chiche est choisi en raison de sa réponse rapide.

Ce biotest étudie la germination et la croissance durant 28 jours [24, 25] des plantes-tests cultivées en conteneurs remplis du CSB produit à la pépinière. Pour chaque espèce végétale, on a utilisé quatre (04) conteneurs (soit 15 cavités × 04 conteneurs × 02 espèces = 120 plants-tests).

Le biotest a touché uniquement le CSB, étant donné que le MCA étudié à la sortie du digesteur ou du décanteur est considéré mûr (en se basant sur l'âge, dépassant un an, quel que soit le méthacompost étudié). Les paramètres mesurés sont la durée de germination et le pourcentage de germination.

2.5.2 Evaluation du comportement des plants d'Acacia

Pour apprécier le comportement végétatif des plants considérés d'Acacia cyanophylla, on s'est contenté de suivre l'évolution des paramètres morphologiques suivants.

- Pourcentage de germination des semences d'Acacia

Les mesures de la germination ont été effectuées une semaine après le semis, tout en assurant le comptage cumulé tous les 4 jours.

- Accroissement en hauteur des plants d'Acacia

Le suivi de l'évolution de la partie aérienne des plants a été conduit à partir des mesures en cm (intervalles plus ou moins réguliers de 15 jours) depuis le collet jusqu'au bourgeon apical, à l'aide d'une règle graduée.

- Accroissement en diamètre des plants d'Acacia

Les mesures en mm ont été effectuées en même temps que celles de l'accroissement en hauteur, à l'aide d'un pied à coulisse à affichage digital.

Il est à noter que, pour chaque conteneur, on a choisi 05 plants homogènes (05 plants/conteneur, un plant/3 cavités) pour effectuer les mesures en hauteur et en diamètre. Ces mêmes plants ont servi pour tous les relevés de croissance.

- Ratio de robustesse des plants d'Acacia

Il est égal au rapport Hauteur/Diamètre (H/D), exprimé en cm/mm. Le dispositif expérimental mis en oeuvre fait appel à un plan en blocs aléatoires complets (BAC) à un facteur étudié (3 substrats) et un facteur contrôlé (3 blocs). Il s'agit de 18 conteneurs répartis comme suit: 02 conteneurs × 3 substrats × 3 blocs.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats relatifs à la caractérisation physico-chimique des substrats

3.1.1 Résultats de porosité

- Résultats relatifs aux substrats purs

La figure 3 illustre les valeurs moyennes de porosités (totale, d'aération et de rétention) obtenues pour les trois substrats purs considérés.

En se référant aux résultats acquis, on peut tirer les constatations suivantes:

- Tous les substrats purs (CSB, MCAA et MCAA') répondent aux normes concernant la porosité totale Pt, qui est supérieure à 50 %.

- Le CSB est caractérisé par une Pt et une Pa importantes et une Pr relativement acceptable. Ses particules grossières favorisent la Pa, et par conséquent, il est considéré comme substrat aérateur.

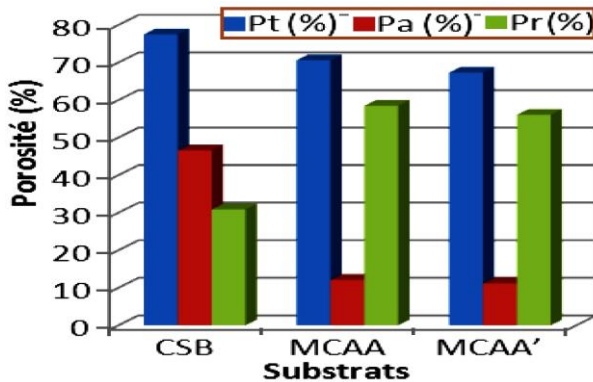


Fig. 3: Résultats de porosité relevés pour les différents substrats purs testés

- Le MCAA et le MCAA' présentent une porosité de rétention Pr, élevée et une porosité d'aération 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.

Les particules affinées 'MCAA et MCAA'', à l'état pur, devraient être évitées 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 MCAA ou du MCAA' semble nécessaire pour améliorer sa teneur en eau. En plus, le MCAA ou le MCAA' exigent 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 amélioration physique.

- Résultats relatifs aux mélanges considérés

Les deux figures 4 et 5 représentent la variation des porosités Pt, Pa et Pr suivant les différents mélanges réalisés. L'analyse de la figure 4 relative au cas du mélange (CSB +

MCAA) permet de déduire que les divers mélanges répondent aux normes de point de vue Pt et Pr.

Seul le mélange (80 % CSB + 20 % MCAA) répond aux normes concernant la Pa, alors que les trois autres présentent des pourcentages en porosité d'aération Pa, qui sont assez faibles.

Pour le cas du mélange CSB avec MCAA', illustré sur la figure 5, les quatre mélanges répondent aux normes pour la Pt et la Pr.

Le mélange (80 % CSB + 20 % MCAA') est aussi le seul qui répond aux normes de porosité dans l'ensemble. Les trois autres mélanges ne répondent pas aux normes concernant Pa.

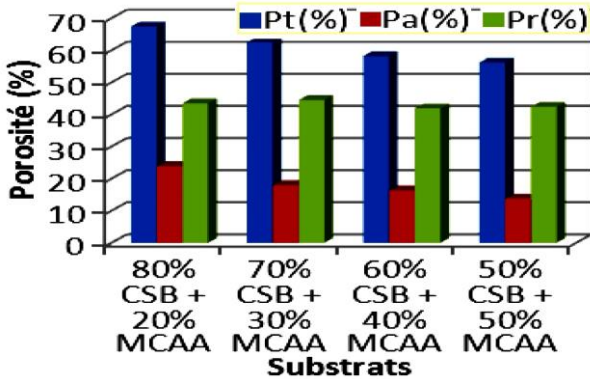


Fig. 4: Résultats de porosité relevés pour le mélange CSB et MCAA

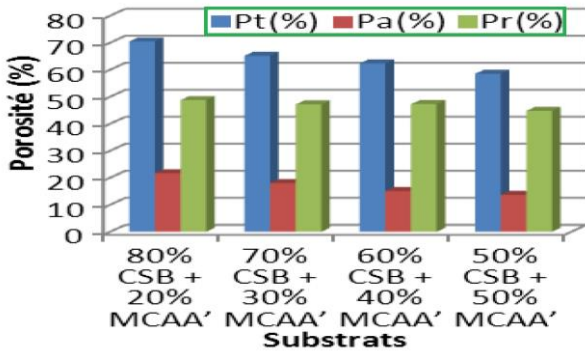


Fig. 5. Résultats de porosité relevés pour le mélange CSB et MCAA'

On a retenu les deux mélanges 80 % CSB + 20 % MCAA (M1) et 80 % CSB + 20 % MCAA' (M2) comme meilleurs substrats, du point de vue propriétés physiques pour suivre la germination et la croissance des plants forestiers en culture hors sol.

La détermination des caractéristiques physiques d'un substrat de croissance joue un rôle important pour la réussite des cultures hors sol. Les trois porosités sont dépendantes les unes des autres. Il ne faut pas oublier que ces critères sont modifiés en cours de culture, d'abord par la colonisation des racines, puis par une modification des propriétés structurales au cours du temps [26].

On vient de remarquer que les méthacomposts MCAA et MCAA' ne présentent pas des différences remarquables de point de vue propriétés physiques. La différence pourrait apparaître concernant la maturation. Le méthacompost collecté à la sortie du digesteur (MCAA') est en principe plus mûr, étant donné son séjour prolongé dans le digesteur.

3.1.2 Comportement chimique

Toutes les valeurs relevées représentent la moyenne de trois répétitions de chaque substrat mis à l'essai. Le Tableau 2 suivant récapitule les résultats obtenus pour chaque substrat testé et pour chaque paramètre chimique considéré.

Tableau 2: Récapitulatif des paramètres chimiques comparés relevés

Substrats	CSB	MCAA	MCAA'	M1	M2
pH	7.20	8.70	8.20	8.30	7.80
CE (mmhos/cm)	1.20	2.60	2.90	1.60	1.80
Salinité (g/l)	0.84	1.82	2.03	1.12	1.26
MO (%)	86.2	36.5	32.5	71.3	70.6
COT (%)	47.9	20.3	18.0	39.6	39.2
N (%)	1.40	2.60	2.40	1.70	1.90
C/N	34.2	7.8	7.5	23.3	20.6
P (%)	0.06	0.78	0.75	0.24	0.25
K (%)	0.81	1.86	1.73	1.47	1.42
Ca (%)	2.09	2.34	2.50	2.28	2.23

L'analyse des résultats des analyses chimiques permet de ressortir les principales constatations suivantes.

- 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 [27] ou entre 7 et 9 [28]. Les MCA utilisés, comme substituts partiels du CSB, sont à considérer ainsi comme substrats mûrs. Les valeurs du pH de différents substrats testés sont élevées. Seul le CSB présente une valeur acceptable, inférieure à 7.5. L'addition du MCA au CSB, à faible proportion, a un effet significatif sur l'augmentation du pH.

- Selon [29], les substrats de culture devraient avoir une faible CE inférieure à 3 mS/cm. Au delà de cette norme, des conséquences négatives pourraient avoir lieu sur la germination et l'émergence des semences de certaines essences forestières. Les substrats évalués (**Tableau 2**) montrent tous des valeurs conformes avec les normes établies pour les supports de culture.

Les mesures de la CE montrent une légère salinité induite par les produits organiques (MCAA et MCAA') et qui dévoilent les valeurs les plus élevées. Leur mélange avec le CSB permet de diminuer sensiblement les valeurs obtenues de plus de 1g/l. Notons que le niveau de salinité atteint demeure non fatal si l'accumulation des sels lors de la fertigation est limitée.

- La teneur en MO a atteint des valeurs extrêmes pour le CSB et les deux mélanges M1 et M2 malgré que les MCAA et MCAA' présentent les plus faibles valeurs. Cette élévation est due à leur mélange avec le CSB substrat très riche en MO d'autant plus que le méthacompost avicole (quelque soit sa provenance) a été incorporé à faible volume. [30] aperçoit que dans le cas des composts, la teneur en MO résulte principalement de son degré de maturité.

Plus cette teneur est élevée, plus le phénomène de minéralisation est important. Selon les Directives rapportées par [31], 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). D'après ce critère, seuls les deux MCA sont considérés comme des produits mûrs et stables. L'ajout du CSB au MCA semble amoindrir 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 [32]. Par comparaison aux études antérieures sur le compostage de la biomasse forestière en Tunisie [20], le taux moyen de MO du CSB testé demeure similaire.

- La teneur en N est très variable selon les substrats. Les valeurs maximales mesurées sont relatives aux MCAA et MCAA' qui sont à minéralisation plus rapide. Leur mélange avec le CSB permet d'améliorer davantage les qualités de ce dernier en termes de % N, puisqu'il est considéré comme élément à minéralisation plus lente. Les teneurs en azote du CSB comme des MCA sont appropriées conformément aux normes énoncées par [1]. Suivant ces dernières, un compost destiné à être utilisé en horticulture, doit avoir une teneur en azote supérieure à 1 % (%MS). Selon [33], la teneur en azote doit être comprise entre 0.92 et 2.76 %.

Suivant [1], 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 (Van Den Berg 1982). Cette teneur relevée dépend du degré de maturité qui est apprécié par le rapport C/N. Comparativement aux travaux antérieurs sur le compostage de la biomasse forestière en Tunisie [20], la teneur relevée d'azote du CSB est relativement faible par rapport aux résultats obtenus lors des autres travaux (teneur observée égale à 2 %).

- Les teneurs en P, K et Ca sont également variables. De même, les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le cas des MCAA et MCAA'. Le CSB est moins riche en éléments minéraux. De ce fait, les mélanges effectués permettent d'améliorer amplement la composition chimique du CSB en ces éléments, et par conséquent, une telle pratique aurait incontestablement une incidence sur la fréquence de fertigation présentement adoptées.

3.2 Résultats relatifs aux suivis agronomiques

3.2.1 Biotest de germination

Un suivi de la germination des semences des haricots et des pois chiche semées en même temps dans le compost sylvicole pur à tester, a été réalisé pendant 28 jours. Les résultats de suivi sont affichés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3: Résultats du biotest de germination

Plants-tests	Durée de germination (j)	Taux de germination (%)
Haricot	12	85
Pois chiche	8	88

On constate que le biotest réalisé a donné une germination élevée supérieure à 80 % pour l'haricot ainsi que pour le pois chiche. De même, on remarque que les deux

légumineuses montrent une meilleure croissance de la partie aérienne. Donc, le CSB, produit à la pépinière, peut être considéré mûr. La bonne germination indique que le compost ne contient pas de substances phénoliques qui peuvent entraver la germination des plants [34].

Le compost peut être employé pour la production de jeunes plants, avec, comme avantage par rapport à la tourbe, de produire des plants plus résistants aux pathogènes [35]. Les potentialités d'emploi des composts sont prometteuses, mais restent strictement tributaires de leur aspect qualitatif.

3.2.2 Suivi de germination des semences d'Acacia

La figure 5 illustre l'évolution du pourcentage de germination des plants d'Acacia en fonction du substrat au cours du temps. Les pourcentages cumulés de germination correspondent aux moyennes de deux conteneurs par substrat.

La figure 5 illustre les résultats relevés de germination cumulée. On peut distinguer trois phases:

- Une phase de latence, nécessaire à l'apparition des premières germinations qui se prolonge quatre (04) jours pour les divers substrats. Au cours de cette phase, le taux de germination reste faible. La durée de cette phase est variable selon la nature de substrat. Le SC présente le % le plus élevé de l'ordre de 30 % vers la fin de cette phase.

- Une phase sensiblement linéaire, correspondant à une augmentation rapide du taux de germination qui évolue proportionnellement au nombre de jours. L'augmentation est de l'ordre de 50 % pour les trois substrats testés.

- Un palier représentant le pourcentage final de germination.

Par voie de comparaison entre les trois substrats, il paraît que le taux de germination du substrat SC évolue plus rapidement que les autres substrats. Cependant, l'évolution la plus lente du taux de germination est observée au niveau du substrat SA. Le substrat SB a un comportement intermédiaire.

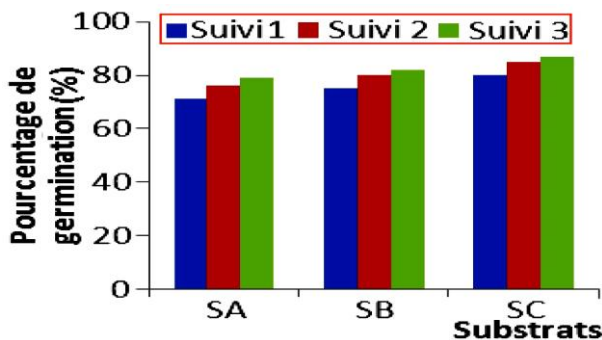


Fig. 5: Variation de la cinétique de germination de semences d'Acacia

3.2.3 Accroissement en hauteur des plans d'Acacia

La figure 6 illustre l'évolution de la hauteur des plants d'Acacia. Les résultats sont les moyennes des mesures en hauteur à raison de 10 plants/substrat × 3 blocs = 30 plants/substrat.

Selon [19], la hauteur constitue un bon indicateur de la capacité photosynthétique et de la surface de transpiration, qui sont étroitement corrélés avec le nombre des feuilles. Elle semble prédire la croissance en hauteur des plants.

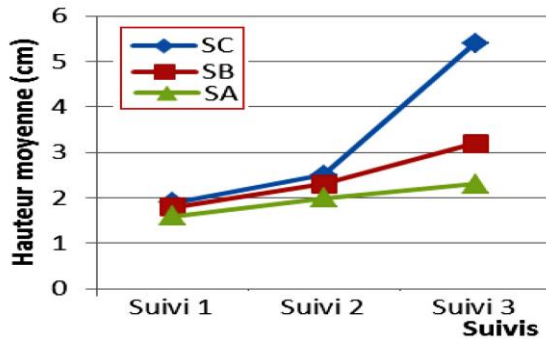


Fig. 6: Evolution de la hauteur moyenne en cm de plants d'Acacia

L'évolution de la hauteur des plants d'Acacia en fonction du nombre de jours après semis, montre que la réponse de ces plants vis-à-vis des divers substrats n'est pas la même. Les plants sont sensibles, dès les premiers stades de croissance à la nature et à la composition du substrat. Cette sensibilité est généralement en rapport avec les propriétés physico-chimiques de chaque substrat, notamment sa qualité physique.

On constate que les plants installés sur le SA seul présentent dès le début un retard de croissance par rapport à ceux installés sur les deux mélanges confectionnés SB et SC, probablement dû à un mauvais contact de la graine avec les particules environnantes grossières, ou bien à la faible richesse du SA en éléments minéraux.

3.2.4 Accroissement en diamètre des plants d'Acacia

Le diamètre au collet est généralement corrélé à plusieurs variables morphologiques (hauteur, poids sec total, poids sec des racines et poids sec de la partie aérienne), car il s'agit d'une variable qui intègre la réponse morphologique aux facteurs environnementaux.

Certains travaux ont montré que le diamètre au collet peut expliquer plus de 97 % de la variation observée concernant la masse totale du plant. Les plants ayant un gros diamètre possèdent généralement des racines latérales bien développées tout en conférant aux plants un meilleur taux de survie [36].

L'évolution du diamètre des plants d'Acacia est illustrée sur la figure 7. Cette évolution correspond à la moyenne de 30 mesures spécifiques au diamètre pour chaque substrat.

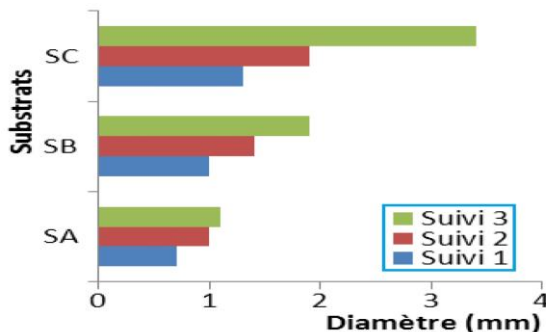


Fig. 7: Evolution du diamètre moyen en mm de plants d'Acacia

Le mélange CSB et MCAA' (SC) présente la croissance en diamètre la plus importante de l'ordre de 3.4 mm. Comme pour la hauteur, le substrat à base du mélange CSB et MCAA (SB) donne des valeurs moyennes, alors que le SA vient en dernière position avec des valeurs largement inférieures. On peut dire qu'il s'agit d'une relation de proportionnalité entre la croissance en hauteur et celle en diamètre.

3.2.6 Ratio de robustesse des plants d'Acacia

Les résultats relatifs à ce paramètre sont représentés sur la figure 8. Le but de ce contrôle est d'atteindre un format de plant idéal en hauteur, en diamètre et en ratio de robustesse. Ces normes de qualité sont relatives non seulement à la morphologie, mais aussi à la physiologie des plants.

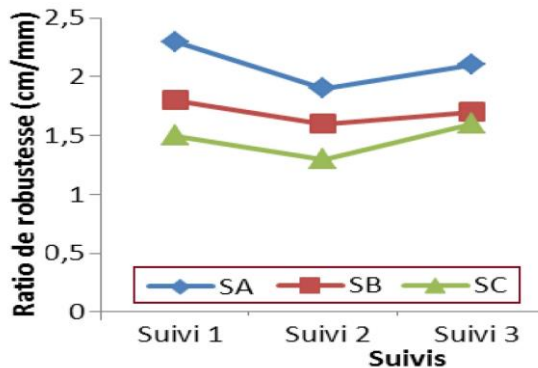


Fig. 8: Evolution du ratio de robustesse de plants d'Acacia

Selon les normes signalées par [19], le ratio de robustesse: hauteur/diamètre (H/D) exprimé en (cm/mm) devrait être inférieur à 7. De ce fait, les résultats sont conformes aux normes. On constate que le substrat pur SA présente un ratio de robustesse un peu plus élevé que ceux des mélanges SB et SC.

Dans l'état actuel, il est à noter que ce rapport ne peut pas être un critère de caractérisation des substrats de croissance, vu que les plants d'Acacia n'ont pas atteint le long de la période de suivi un stade de développement avancé. Le résultat relevé devrait être admis avec prudence.

4. CONCLUSION

A la lumière des résultats acquis à propos de la présente investigation, portant sur les possibilités de valorisation agronomique, hors sol de la biomasse avicole traitée dans un digesteur industriel alimenté en continu, on a pu tirer divers constats importants.

Ainsi, l'étude de la substitution partielle du compost sylvicole (substrat de référence) par le méthacompost avicole (à la sortie du décanteur ou du digesteur) dans la confection des substrats de culture des plants forestiers a permis de ressortir les acquis essentiels ci-après.

- Le compost CSB ne peut pas être considéré comme un bon substrat de croissance à l'état pur, étant donné sa porosité d'aération (Pa) élevée et sa porosité de rétention inconvenable.

- Les méthacomposts MCAA et MCAA' ne peuvent pas être vus aussi comme des

bons substrats à l'état pur, à cause de leur porosité de rétention (Pr) trop importante (substrats rétenteurs), ce qui justifie leur mélange avec le CSB, considéré généralement comme substrat aérateur.

- Les meilleurs mélanges de point de vue physique sont: M1 (80 % CSB + 20 % MCAA) et M2 (80 % CSB + 20 % MCAA').

- L'efficacité de l'association du CSB avec MCAA ou MCAA' est appréciée à travers l'amélioration, l'équilibre et la correction opérés concernant spécialement la plupart des éléments minéraux étudiés (N, P, K et Ca).

- L'appréciation de la maturité du CSB produit à la pépinière sur légumineuses a prouvé un bon état de maturation de ce compost.

- Il existe un léger accroissement du taux de germination des semences d'Acacia semées sur substrat à base du mélange CSB et MCAA' que sur celui à base du mélange CSB et MCAA. Le CSB seul montre un taux de germination plus faible et assez éloigné de celui obtenu pour les mélanges étudiés.

- La croissance en hauteur et en diamètre des plants: il a été également dévoilé que les croissances en hauteur et en diamètre des plants d'Acacia cyanophylla ont été significativement influencées par le type du MCAA incorporé avec le CSB. Le mélange contenant le MCAA' a montré une supériorité nette en matière d'évolution des plants en hauteur et en diamètre, par contre, les ratios de robustesse sont globalement inférieurs à celui des plants cultivés sur le CSB (substrat standard).

Remerciements- Les auteurs remercient vivement tous les organismes impliqués dans ce travail, réalisé en Tunisie, et qui n'a été possible que grâce à la participation de la Société Avicole Frères Mhiri localisée à Hammam Sousse et de la Pépinière Forestière Moderne de Chott-Mariem.

REFERENCES

- [1] L. Van Den Berg, '*Anaerobic Digestion of Wastes*', Conservation and Recycling, Vol. 5, Vol. 1, pp. 5 - 14, 1982.
- [2] A. Saïdi et B. Abada, '*La Bio méthanisation: Une Solution pour un Développement Durable*', Revue des Energies Renouvelables, CER'07 Oujda, pp. 31 - 35, 2007. www.cder.dz/download/cer07_7.pdf
- [3] I. Tou, S. Igoud et A. Touzi, '*Production de Biométhane à partir des Déjections Animales*', Revue des Energies Renouvelables, Production et Valorisation, Biomasse, pp. 103 - 108, 2001. www.cder.dz/download/bio_17.pdf
- [4] D. Verrier, J.N. Morfaux, G. Albagnac and J.P. Touzel, '*The French Programme on Methane Fermentation*', Biomass, Vol. 2, N°1, pp. 17 - 28, 1982.
- [5] F. Beline et A. Gac, '*La Méthanisation: Un Moyen de Valoriser la Matière Organique des Déjections Animales et de Réduire les Emissions de Gaz à Effet de Serre*', SinfoTech, Les Fiches Savoir-Faire, Cemagref, 4 p., 2007.
- [6] M. Macias-Corral, Z. Samani, A. Hanson, G. Smith, P. Funk, H. Yu and J. Longworth, '*Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste and Agricultural Waste and the Effect of Co-Digestion with Dairy Cow Manure*', Bioresource Technology, Vol. 99, N°17, pp. 8288 - 8293, 2008.
- [7] A. Schievano, M. Pognani, G. d'Imporzano and F. Adani, '*Predicting Anaerobic Biogasification Potential of Ingestates and Digestates of a Full-Scale Biogas Plant Using*

Chemical and Biological Parameters, Bioresource Technology, Vol. 99, N°17, pp. 8112 - 8117, 2008.

- [8] J.B. Holm-Nielsen, T. Al Seadi and P. Oleskowicz-Popiel, '*The future of anaerobic digestion and biogas utilization*', Bioresource Technology, Vol. 100, N°22, pp. 5478-5484, 2009.
- [9] R. Moletta, '*Contrôle et Conduite des Digesteurs Anaérobies*', Revue des Sciences de l'Eau, Vol. 2, N°2, pp. 265 - 293, 1989. www.rse.inrs.ca/art/volume2/v2n2_265.pdf
- [10] P. Brondeau, B. de La Farge et M. Heduit, '*Un Nouveau Procédé de Fermentation Méthanique en Continu pour les Lisiers: Production d'Energie, Dépollution et Désodorisation*', Génie Rural, N°1-2, pp. 5 - 10, Janvier-Février 1982.
- [11] I. Angelidaki and L. Ellegaard, '*Codigestion of Manure and Organic Wastes in Centralized Biogas Plants*', Applied Biochemistry and Biotechnology, Vol. 109, N°1-3, pp. 95 - 105, 2003.
- [12] P.W. Westerman and J.R. Bicudo, '*Management Considerations for Organic Waste Use in Agriculture*', Bioresource Technology, Vol. 96, N°2, pp. 215 - 221, 2005.
- [13] B. Sylvestre, '*Biogaz de Fermes d'Elevage et de Bâtiments d'Exploitation*', Environmental Technology ans Management, Hogeschool Brabant, Breda, Pays-Bas, 30 p., 2003.
- [14] P. Mallard, D. Rogeau, B. Gabrielle, M. Vignoles, C. Sablayrolles, V. Le Corff, M. Carrère, S. Renou, E. Vial, O. Muller, N. Pierre and Y. Coppin, '*Impacts Environnementaux de la Gestion Biologique des Déchets*', Rapport final de l'Etude entre l'Adème et le Groupement Cemagref-Inra-Creed-Anjou Recherche-Ecobilan-Orval, 131 p., 2005.
- [15] P. Pouech, '*Principales Caractéristiques des Digestats*', Journée Technique Nationale, 'Réussir un Projet de Méthanisation Associant des Déchets Ménagers Agricoles et Industriels', Adème, France, 6 p., Octobre 2008.
- [16] G. Amand, A. Bonnouvrier, D. Chevalier, E. Dezat, C. Nicolas et P. Ponchant, '*Les Consommations d'Energie dans les Bâtiments Avicoles. Quelques Repères sur les Consommations d'Energie et Propositions de Pistes d'Amélioration*', Edition 'ITAVI', N°1, 24 p., 2008. www2.ademe.fr/.../getBin...
- [17] R. Baumann, '*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, 2010.
- [18] Alcor et Axenne, '*Etude Stratégique pour le Développement des Energies en Tunisie*', Bilan des Réalisations et Rapport Final de l'Agence Nationale des Energies Renouvelables, 'ANER', pp. 148 - 157, 2003.
- [19] M.S. Lamhamedi, J.A. Fortin, Y. Ammari, S. Ben Jalloun, M. Poirier, B. Fecteau, A. Bougacha et L. Godin, '*Evaluation des Composts, des Substrats et de la Qualité des Plants (Pinus pinea, Pinus halepensis, Cupressus sempervirens et Quercus suber) Elevés en Conteneurs*', Projet Bird 3601. Rapport technique: *Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie*, DGF Tunisie et PAMPEV Internationale Ltée, Québec, Canada, 120 p., 1997.
- [20] Y. Ammari, M.S. Lamhamedi, N. Akrimi et A. Zine El-Abidine, '*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, Tunisie, Vol. XVIII, pp. 99 - 119, 2003. www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/.../I-N-A-T-18-2-.pdf
- [21] CPVQ, '*Pépinière- Culture en conteneurs- Substrats*', Conseil des Productions Végétales du Québec, 19 p., 1993.

- [22] P. Morard, '*Les Cultures Végétales Hors Sol*', Edition Publications Agricoles, Agen, Paris, pp. 9 - 11, 1995.
- [23] M.P. Bernal, J.A. Albuquerque and R. Moral, '*Composting of Animal Manures and Chemical Criteria for Compost Maturity Assessment*', Bioresource Technology, Vol. 100, N°22, pp. 5444 - 5453, 2009.
- [24] C. Juste, P. Solda and P. Dureau, '*Test Agronomique Simple Destiné à Juger Rapidement de la Phytotoxicité Eventuelle et du Degré de Maturité d'un Compost d'Ordures Ménagères*', Comité -Sols et Déchets-, 1973-1983. Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets, Nantes, 4 p., 1985.
- [25] S. Goyal, S.K. Dhull and K.K. Kapoor, '*Chemical and Biological Changes During Composting of Different Organic Wastes and Assessment of Compost Maturity*', Bioresource Technology, Vol. 96, N°14, pp. 1584 - 1591, 2005.
- [26] F. Lemaire, A. Dartigues, L.M. Rivières et S. Charpentier, '*Culture en Pots et Conteneurs - Principes Agronomiques et Applications*', INRA, Paris, France, 181 p, 1989.
- [27] M. Larbi, '*Influence de la Qualité des Composts et de leurs Extraits sur la Protection des Plantes contre les Maladies Fongiques*', Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel, 126 p., 2006. orgprints.org/8935/1/larbi-2006-dissertation.pdf
- [28] M.P. Bernal, C. Paredes, M.A. Sánchez-Monedero and J. Cegarra, '*Maturity and Stability Parameters of Composts Prepared with a Wide Range of Organic Wastes*', Bioresource Technology, Vol. 63, N°1, pp. 91 - 99, 1998.
- [29] C. Serra-Wittling, S. Houot and E. Barriuso, '*Soil Enzymatic Reponse to Addition of Municipal Solid-Waste Compost*', Biology and Fertility of Soils, Vol. 20, N°4, pp. 226 - 236, 1995.
- [30] M. Mustin, '*Le Compost. Gestion de la Matière Organique*', Edition François Dubusc, Paris, 954 p., 1987.
- [31] J.G. Fuchs, U. Galli, K. Schleiss et A. Wellinger, '*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., 2001.
- [32] A. Kerkeni, '*Contribution à la Valorisation des Composts et des Jus de Composts: Incidence sur la Fertilisation et la Protection Phytosanitaire de Quelques Espèces Légumineuses*', Thèse de Doctorat, Sciences Agronomiques de l'Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem, Tunisie, 158 p., 2008.
- [33] J.G. Fuchs, U. Baier, A. Berner, J. Mayer, L. Tammi and K. Schleiss, '*Potential of Different Composts to Improve Soil Fertility and Plant Health*', Orbit: Part 2, pp. 507-517, 2006.
- [34] D.M. Sullivan and R.O. Miller, '*Compost Quality Attributes, Measurements and Variability*', In: P.J. Stofella and B.A. Khan (Eds.) *Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems*, Lewis Publishers, New York, USA, pp. 95 - 120, 2001.
- [35] H.A.J. Hoitink, A.G. Stone and D.Y. Han, '*Suppression of Plant Diseases by Composts*', HortScience, Vol. 32, N°2, pp. 184 - 187, 1997.
- [36] M.S. Lamhamedi, B. Fecteau, L. Godin, Ch. Gingras, R. El Aini, Gh. Gader et M.A. Zarrouk, '*Guide Pratique de Production en Hors Sol de Plantes Forestiers, Pastorales et Ornementales en Tunisie*', Projet: ACIDI E4936-K061229. Direction Générale des Forêts, Tunisie et Pampev Internationale Ltée, Québec, Canada, 114 p., 2006. mrn.gouv.qc.ca/.../forets/.../Guide-production-hors-sol-Tunisie.pdf