

Caractérisation qualitative du digestat solide de la bio méthanisation industrielle des fientes avicoles et alternative de son exploitation agronomique hors sol

Youssef M'Sadak* et Abir Ben M'Barek

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

(reçu le 21 Mai 2012 – accepté le 10 Avril 2013)

Résumé - La valorisation maraîchère des résidus (ou digestats) de la bio méthanisation industrielle appliquée aux fientes avicoles s'avère écologiquement intéressante. Si l'on tente de résumer les interrogations posées par l'emploi de ces résidus en horticulture, le grand principe discuté était la contribution à trouver des produits alternatifs à la tourbe, qui peuvent se substituer à elle d'abord partiellement en mélange, et dans un avenir plus lointain la remplacer dans la plus grande partie de ses usages horticoles. Le méthacompost avicole (issu de la fermentation anaérobie industrielle des fientes avicoles) peut être utilisable comme substitut partiel de la tourbe dans la confection des substrats de culture. L'effet positif lié à l'utilisation de la MO humifiée des composts mûrs ne peut s'exprimer pleinement et avec sécurité que si l'on a réuni les conditions nécessaires à l'épanouissement de la plante: respect du pH, pourcentage d'aération, bonne hygiénisation par traitement biologique (bio méthanisation et/ou compostage) et teneurs équilibrées en éléments minéraux.

Abstract - The valorization of vegetable residues (or digests) of industrial biomethanization applied to poultry manure appears to be ecologically interesting. If one attempts to summarize the raised questions about the use of these residues in horticulture, the great discussed principle was the contribution to find alternatives to peat, which can substitute it first partially in a mixture, and replace it in most of its horticultural applications. The poultry methacompost (derived from the industrial anaerobic fermentation of poultry manure) can be used as partial substitute of peat in making cultivation substrates. The positive effect related to the use of humified OM from mature compost cannot be safely and fully expressed unless the conditions required for the development of the plant were met: respect of pH, aeration percentage, good hygienization by biological treatment (anaerobic digestion and / or composting) and equilibrated minerals contents.

Mots clés: Biomasse avicole – Bio méthanisation - Méthacompost avicole - Substitut partiel – Tourbe - Culture hors sol.

1. INTRODUCTION

L'emploi de la digestion anaérobie 'DA' a des sérieux atouts pour s'imposer dans de nombreux secteurs générateurs de déchets, particulièrement agricoles d'origine animale. A cet égard, les déjections animales sont particulièrement intéressantes à utiliser, quand elles sont produites en quantités importantes et régulières [1] et surtout lorsqu'elles sont traitées biologiquement (par bio méthanisation et/ou par compostage) avant utilisation.

* msadak.youssef@yahoo.fr

En effet, l'utilisation agronomique des résidus 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.

Plusieurs recherches ont montré que les composts, produits à partir de divers déchets (fumiers d'animaux, écorces de pin, déchets verts) ont des effets bénéfiques dans les systèmes de production en pépinières [2] et pourraient ainsi servir comme un substitut partiel ou total de la tourbe dans les substrats de culture [3], afin de réduire les coûts de production des substrats et tout en respectant les normes d'une agriculture durable [4].

La tourbe couramment utilisée dans la fabrication des substrats horticoles est une ressource non renouvelable [3, 5]. Face à ce constat, quelques orientations méritent d'être discutées. Il serait intéressant de développer la recherche de produits alternatifs d'origine naturelle ou manufacturée, fibreux ou granulaires et d'inciter à l'emploi des produits de substitution partielle, qui sans perdre les avantages de la tourbe (considérée comme le substrat de référence pour la production hors sol des plants), permettent d'en limiter les quantités employées, réduisant ainsi les importations, et par conséquent, l'hémorragie des devises.

Le digestat, coproduit secondaire de la bio méthanisation, 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 (ou post-traitement) de ce coproduit permet généralement l'obtention d'un digestat solide appelé méthacompost et d'un digestat liquide appelé jus de process.

Le présent travail, entrepris en Tunisie, consiste à déterminer quelques critères de qualité physico-chimique du méthacompost avicole (MCA) issu de la bio méthanisation industrielle appliquée à la biomasse générée par l'élevage intensif de 20000 poules pondeuses. Ces critères qualitatifs s'avèrent indispensables pour une meilleure valorisation agronomique en pépinière maraîchère hors sol.

Cette étude préliminaire, basée sur une évaluation directe, admettrait d'apporter des corrections en vue d'obtenir un substrat de culture ayant les exigences physiques et chimiques prétendues en faisant appel à un mélange de tourbe et de MCA.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel expérimental

Le choix du substrat dans la production maraîchère hors sol est très important. Aujourd'hui, la tourbe est la principale composante des substrats utilisés en pépinière, grâce à ses nombreuses caractéristiques intéressantes.

Elle possède physiquement une porosité de rétention et une porosité d'aération convenables, c'est pourquoi d'autres matières y sont généralement ajoutées en mélange à titre de substitution (tels que le compost sylvicole, réputé aérateur et le MCA dans le cas étudié, réputé rétenteur).

Le MCA 'sous-produit solide', objet de cette recherche, est issu de la bio méthanisation industrielle de la biomasse avicole (récupérée au niveau du décanteur de l'installation). Le digesteur industriel, produisant ce résidu, fait partie d'un projet pilote de production de biogaz localisé à Hammam Sousse, gouvernorat de Sousse, Tunisie.

Ce projet pilote a été réalisé en 2000 dans le cadre de la nouvelle stratégie adoptée par l'Agence Nationale des Energies Renouvelables (ANER) qui vise le développement

des systèmes industriels de biogaz. Il s'agit d'un digesteur d'une capacité de 300 m³, alimenté en continu quotidiennement par 10 m³ de substrat composé d'environ de 2/3 d'eau et 1/3 de fientes avicoles [6].

2.2 Evaluation des principales propriétés physico-chimiques

Les principales propriétés physiques et chimiques que devrait posséder un substrat de culture sont identifiées ci-dessous et une brève description de chacune d'elle est présentée. Chaque essai préliminaire correspond à une répétition.

2.2.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente 'mva' correspond à la masse de l'unité de volume à l'état sec. La mesure de 'mva' a été réalisée sur les divers substrats mis en œuvre. Elle consiste à mettre les échantillons dans l'étuve à une température de 105°C pendant 24 heures pour déterminer la masse sèche [7]. Elle est déterminée en appliquant la formule suivante:

$$\text{mva (g/m}^3\text{)} = \frac{M_s - M_c}{V}$$

avec, M_s , la masse sèche de l'échantillon, (g); M_c , la masse de la capsule vide, (g); et V , le volume de la capsule de 100 cc.

2.2.2 Porosité totale

La porosité ou l'espace poral correspond à l'évaluation des espaces vides par rapport à l'encombrement total d'un substrat [8]. La porosité totale (P_t) 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 porosité totale est difficile à mesurer directement. Il en existe, en effet, plusieurs formulations qui diffèrent légèrement les unes des autres [8]. Parmi lesquelles, on a employé celle de Gras utilisée par [9] et qui est exprimée par la formule ci-après.

$$P_t (\%) = 95.83 - 32.43 \text{ mva}$$

2.2.3 pH

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.

2.2.4 Conductivité électrique

La conductivité électrique 'CE' est la mesure la concentration des ions solubles ou la salinité du compost [10]. Elle est mesurée par le conductimètre et elle est couramment exprimée en mS/cm ou mmhos/cm³. Un échantillon de substrat est extrait avec de l'eau à 20 ± 1°C (Rapport d'extraction de 1: 5 pour dissoudre les électrolytes).

2.2.5 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 consiste à un pesage de 20 g de chaque substrat qu'on met dans l'étuve pendant 24 heures à 70°C, puis on fait la calcination de 3 g des échantillons, préalablement séchés pendant 2 heures à l'étuve, à 900°C pendant au moins 6 heures dans un four à moufle et on détermine le Résidu Sec 'RS'.

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

$$\text{MO (\%)} = \left[\frac{P_3 - P_4}{P_3} \right] \times 100$$

Avec, P_3 , le poids avant calcination, mg; P_4 le poids après calcination, mg.

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

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

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

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

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

2.2.6 Dosage de l'azote

L'azote est dosé par la méthode de Kjeldhal [11] dont le principe repose sur l'attaque de l'extrait par l'acide sulfurique concentré (H_2SO_4). L'azote organique se transforme en azote ammoniacal.

Le dosage d'azote repose sur le principe décrit ci-après. Dans chaque matras à digestion, on introduit 200 mg du substrat tout en évitant d'en déposer sur le col du matras, 5 ml d'acide sulfurique concentré; c'est la phase de minéralisation.

Après un repos de 30 mn, 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 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.

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

2.2.7 Dosage d'autres éléments minéraux

Le dosage des éléments chimiques a touché aussi le potassium (K), le calcium (Ca) et le sodium (Na) à l'aide d'un photomètre à flamme. Il nécessite une minéralisation et une préparation des solutions d'étalonnage, la minéralisation étant une étape commune, seulement la nature et la solution d'étalonnage différent d'un paramètre chimique à un autre.

On pèse 1 g de chaque substrat (avec trois répétitions pour chacun) 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 le bain à sable jusqu'à l'évaporation totale de l'acide. On ajoute 5 ml d'acide chlorhydrique (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. Le calcul du pourcentage de chaque élément (% MM) se fait comme suit:

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

Avec, n, la valeur trouvée, µg/ml; D, est la dilution de la solution à photomètre (D = 1); V : le volume de la solution ml (V = 100 ml); p: Prise d'essai (g).

Les formes minérales sont les formes oxydées d'éléments majeurs. Elles sont obtenues à partir de la calcination de la MS. Les % de K₂O et de CaO sont déterminés en ayant recours aux deux expressions suivantes:

$$K_2O (\%) = 1,2 \times K (\%)$$

$$CaO (\%) = 0,7 \times Ca (\%)$$

3. RESULTATS ET DISCUSSION

La valeur du compost (ou du méthacompost) peut varier en fonction de l'usage qui va être fait et en fonction de l'effet qui est recherché par l'utilisateur [4]. Seul l'usage agronomique est envisagé lors de cette étude.

3.1 Appréciation de la qualité physique des substrats

Cette appréciation a touché les paramètres physiques relatifs à la 'mva' comme ceux relatifs à la porosité totale. Il convient de signaler auparavant que les résultats physiques en question peuvent être influencés par la variation du degré de compactage d'un substrat à un autre à partir du remplissage des capsules utilisées lors de la réalisation de tests correspondants.

3.1.1 Evaluation de la masse volumique apparente sèche

Le MCA présente une 'mva' très élevée (0,78 g/cm³) et qui dépasse largement les valeurs habituelles relatives aux supports de culture. Ce matériau peut être classé comme substrat lourd. Il présente le degré de compactage le plus important.

Il reste à vérifier les constatations relevées par [12] qui affirment que la 'mva' a des conséquences directes sur la croissance et la morphologie des racines. Il ne peut pas

dans aucun cas être utilisé à l'état pur, car il peut poser des contraintes majeures quant à son emploi pour l'élevage hors sol des plants maraîchers. A ce propos, il convient de recourir à son incorporation partielle avec la tourbe tout en recherchant le ratio de mélange adéquat.

3.1.2 Evaluation de la porosité totale

La porosité du MCA peut être influencée par les dimensions des particules, les propriétés physiques et chimiques et la nature du mélange. La qualité et la composition du substrat de culture jouent un rôle important dans l'obtention des plants de qualité. Un bon substrat de culture possède un ordre de grandeur de la porosité totale de 80 à 90 % pour la tourbe brune [13], mais elle peut atteindre 95 % [14].

Le MCA à l'état pur possède une porosité totale, P_t , insuffisante (70 %) qui peut être due à ses dimensions granulométriques relativement hétérogènes. Il n'existe pas jusqu'à présent des matériaux réellement alternatifs à la tourbe en termes de qualité physique.

Néanmoins, des nombreux produits complémentaires (notamment pour permettre une meilleure aération du substrat) sont disponibles qui peuvent être ajoutés à la tourbe et qui contribuent donc indirectement à une diminution de son utilisation massive dans les supports de culture pour pépinières horticoles.

Finalement, notons que le MCA (considéré habituellement comme substrat rétenteur d'eau), à l'état pur, devrait être évité pour ne pas affecter l'aération, en réduisant l'espace lacunaire favorisant ainsi l'empâtement du substrat.

3.2 Appréciation de la qualité chimique des substrats

3.2.1 Evaluation du pH et de la conductivité électrique

Le pH pourrait être un indicateur de la maturité complète d'un substrat. La valeur du pH d'un compost mûr se situe normalement entre 7 et 8 [15], voire entre 7 et 9 [16]. Le MCA, ayant un pH égal à 7,43, est considéré ainsi comme un substrat relativement mûr.

En se rapportant aux constatations rapportées par [14] et [17], des carences en (Fe, Cu, Mn, B) peuvent se produire et des excès possibles en (Ca, N) peuvent apparaître au niveau de ce substrat. Les résultats des tests de croissance restent les seuls à vérifier ces constatations.

Soumaré *et al.* [18] affirment que les substrats de culture devraient avoir une faible conductivité électrique inférieure à 3 mS/cm. Au delà de cette norme, des répercussions négatives pourraient avoir lieu sur la germination et l'émergence des semences. Le MCA testé présente une valeur conforme avec les normes établies pour les supports de culture de l'ordre de 1,3 mS/cm. La conductivité électrique peut constituer une indication sur la disponibilité des éléments minéraux dans le milieu de culture.

La teneur élevée en sels affecte la croissance des végétaux qui peut résulter des brûlures aux racines et aux feuillages. Il faut garder en mémoire que les plantes s'enracinent mieux dans un substrat contenant peu d'éléments nutritifs [17]. En effet, une valeur élevée représente une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption d'eau et d'éléments nutritifs par la plante et peut même brûler les racines. La salinité peut également se développer à partir de la minéralisation d'azote et de la production d'acides organiques [10]. La bio méthanisation, au contraire, réduit davantage la salinité du matériau de départ (fientes avicoles) du fait que le fumier est connu par sa teneur élevée en sels.

Selon [19], la conductivité électrique du compost ne doit pas dépasser 4 mS/cm. La salinité excessive du compost peut être à l'origine de sa phytotoxicité [10].

3.2.2 Evaluation de la fraction organique

La teneur en matière organique 'MO' est d'une importance fondamentale pour la fertilité, du fait de ses effets physiques, chimiques et biologiques. La tourbe est largement employée en pépinière comme un composant principal des substrats de culture grâce à sa haute teneur en MO [20]. Les fientes des poules pondeuses, d'après [21], présentent un taux de MO de l'ordre de 58 %.

La digestion anaérobie 'DA' est à l'origine d'une réduction significative du taux de MO, qui est de l'ordre de 38 %. La dégradation de la MO des fientes avicoles pendant la digestion anaérobie 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 [22] qui confirme que le digestat produit est pauvre en MO.

D'après les directives rapportées par [19], le compost mûr doit avoir une teneur en MO inférieure à 50 % (% MS). Pour un compost de qualité, du point de vue stabilité et maturité, la teneur en MO devrait être comprise entre 35 et 45 % de % MS. Selon ce critère, le MCA est considéré comme un produit stable.

3.2.3 Evaluation du rapport C/N

La digestion anaérobie 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_{org} vu la relation de proportionnalité entre ces deux paramètres. Malgré cette forte diminution, la teneur en MO du MCA est encore élevée pour permettre la fabrication d'un compost de bonne qualité. Il y a une minéralisation importante de l'azote, lors de la DA, proportionnelle au taux de biodégradation du carbone [23].

La teneur en azote du MCA (2,28 %) est adéquate conformément aux normes décrites par [24]. Selon ces dernières, un compost destiné à être utilisé en horticulture et en maraîchage de pleins champs, doit avoir une teneur en azote supérieure à 1 % de MS. La valeur minimale imposée par la directive de la Communauté Européenne CE est de l'ordre de 0,6 % alors que la valeur maximale imposée par la Norme Française NF U 44-051 est d'environ 2 % sur les supports de culture. Au delà d'une valeur de 2 %, le compost devrait être considéré comme un engrais organique [24]. Cette teneur relevée dépend du degré de maturité qui est apprécié par le rapport C/N. Selon [19], la teneur en azote doit être comprise entre 0,92 et 2,76 %.

La teneur élevée en azote du MCA (2,28 %) est due à la richesse des déjections animales en général, et des fientes avicoles, en particulier, en azote. Étant donné que le MCA possède une teneur assez élevée qui dépasse les teneurs acceptables relatives aux supports de culture, ce matériau organique ne peut pas être utilisé seul comme support de culture. Il conduit souvent à un affaiblissement des résistances mécaniques de la plante et à lui conférer une plus grande sensibilité à certaines maladies cryptogamiques.

Le rapport C/N est fréquemment utilisé pour évaluer le processus de minéralisation de la MO [25] et comme indicateur de maturité des composts [15]. Selon [24], 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 évaluer sa maturité [26].

Ce paramètre présente néanmoins un défaut majeur, en raison du manque de valeurs de référence trop précises. Le faible rapport C/N relevé du MCA (11,25) peut s'expliquer du fait que la minéralisation des composts d'origine animale est plus rapide que celle d'origine végétale (dégradation difficile des polymères: Lignine, Cellulose,...). En outre, le digestat, et particulièrement, le méthacompost est pauvre en MO [22], mais riche en azote.

L'emploi des MO à C/N élevé (tourbes blondes, écorces de Pin,...) doit être préféré dans les supports de culture, car la décomposition lente perturbera moins le milieu physique.

3.2.4 Evaluation des teneurs en autres éléments minéraux

Le MCA est un matériau plus riche en potassium. La teneur moyenne en potassium du MCA produit par bio méthanisation est de l'ordre de 1,83 % en K (2,19 % en K_2O). Cette teneur est hautement supérieure à la valeur minimale imposée par la Directive CE (0,3 % en K_2O) pour permettre la vente des composts.

Le Ca rend le milieu favorable aux microorganismes du sol, agents de la décomposition des MO, de l'humification, de la minéralisation et de la fixation symbiotique. La valeur minimale en CaO imposée par la Directive CE est de 2,0 % [24]. Le MCA produit présente une teneur moyenne en Ca très élevée de l'ordre de 4,13 % (2,89 % en CaO). Cette valeur est généralement plus proche à la Directive CE qui impose une valeur minimale en CaO de 2,0 %.

La teneur assez élevée du Na (0,90 %) au niveau du MCA comparée à celle du compost urbain, dont la teneur est de l'ordre de 0,23 % [24], peut causer des risques de dégradation de structure des sols et des substrats comportant ce matériau. Parmi les risques liés à un excès du Na, une teneur assez élevée peut entraîner des effets dépressifs sur les cultures installées.

La richesse globale en éléments minéraux du MCA pourrait constituer un bon indice pour réduire le nombre de fertigation pratiquées, d'où le double intérêt du MCA comme substrat rétenteur d'eau (rôle physique) et riche en éléments fertilisants (rôle chimique). L'intégration partielle du MCA avec la tourbe ou le compost sylvicole brut (CSB) pour la production des plants maraîchers ou forestiers serait une alternative intéressante d'optimisation physico-chimique des substrats de culture [27].

4. CONCLUSION

La valorisation agronomique hors sol des résidus (ou digestats) de la biométhanisation industrielle appliquée aux fientes avicoles s'avère écologiquement intéressante. Si l'on tente de résumer les interrogations posées par l'emploi de ces résidus en horticulture, le grand principe à discuter serait la contribution à trouver de produits alternatifs à la tourbe, qui peuvent se substituer à elle d'abord partiellement en mélange, et dans un avenir encore lointain la remplacer dans la plus grande partie de ses usages horticoles.

La granulométrie des particules du méthacompost avicole, objet de cette recherche, peut créer des barrières aux échanges gazeux. Tenant compte de cette contrainte physique majeure et de sa masse volumique apparente importante, il peut être utilisable uniquement comme substitut partiel de la tourbe dans la confection des substrats de culture.

Concernant sa qualité chimique, le méthacompost avicole a montré un pH proche de la neutralité et une salinité relativement faible. Ce méthacompost peut être considéré stable et corrélativement mûr et peut être utilisé en horticulture, et particulièrement, en culture hors sol avec beaucoup de précautions. Par ailleurs, le méthacompost avicole est riche en azote et en divers éléments minéraux (K, Ca, Na).

Les résultats acquis au cours de cette étude indiquent des effets non négligeables du méthacompost avicole sur plusieurs paramètres physiques et chimiques des substrats de culture confectionnés. Ainsi, l'aboutissement positif lié à l'emploi de la MO humifiée des composts mûrs ne peut s'exprimer pleinement et avec sûreté que si l'on a rassemblé les exigences obligatoires à la manifestation de la plante notamment: respect du pH toléré, pourcentage favorable d'aération, bonne hygiénisation par bio traitement (bio méthanisation et/ou compostage), teneurs consolidées en éléments minéraux.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] B.A. Kahn, J.K. Hyde, J.C. Cole, P.J. Stoffella and D.A. Graetz, 'Replacement of a Peat-Lite Medium with Compost for Cauliflower Transplant Production', Compost Science and Utilization, Vol. 13, pp. 175 – 179, 2005.
- [3] D.J. van der Gaag, F.R. van Noort, L.H.M. Stapel-Cuijpers, C. Kreij, A.J. Termorshuizen, E. van Rijn, S. Zmora-Nahum and Y. Chen, 'The Use of Green Waste Compost in Peat-Base Potting Mixtures: Fertilization and Suppressiveness Against Soilborne Diseases', Scientia Horticulturae, Vol. 114, N°4, pp. 289 – 297, 2007.
- [4] 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.
- [5] F. Gauthier, S. Gagnon et B. Dansereau, 'Incorporation de Résidus Organiques dans un Substrat Tourbeux pour la Production d'Impatiens et de Géraniums', Canadian Journal of Plant Science, Vol. 78, pp. 131 – 138, 1998.
- [6] Alcor et Axenne, 'Etude Stratégique pour le Développement des Energies Renouvelables en Tunisie - Bilan des Réalisations', Rapport Final de l'Agence Nationale des Energies Renouvelables, pp. 148 – 157, 2003.
- [7] AOAC, 'Official Methods of Analysis', Association of Official Analytical Chemist (AOAC), Washington, DC, 16^{ème} Edition, 1990.
- [8] P. Morard, 'Les Cultures Végétales Hors Sol', Publications Agricoles Agen, Paris, 1995.
- [9] M. Mustin, 'Le Compost: Gestion de la Matière Organique', Edition François Dubusc, Paris, 954 p., 1987.
- [10] S.M. Tiquia, 'Reduction of Compost Phytotoxicity during the Process of Decomposition', Chemosphere, Vol. 79, N°5, pp. 506 – 512, 2010.
- [11] 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, pp. 1584 – 1591, 2005.
- [12] M.S. Lamhamedi, J.A. Fortinn, Y. Ammari, S. Ben Jalloun, M. Poirier, B. Fecteau, A. Bougacha et L. Godin, 'Evaluation des Composts, des Substrats et de Qualité des Plantes

- Elevés en Conteneurs*, Rapport technique: Exécution des Travaux d'Aménagement de Trois Pépinières Pilotes en Tunisie (1997).
- [13] R. Gras et I. Agius, '*Quelques Propriétés Physiques des Substrats Horticoles*', PHM Revue Horticole, Vol. 234, pp. 11 – 13, 1983.
- [14] Conseil des Productions Végétales du Québec, 'CVPQ', '*Pépinières, Cultures en Conteneurs, Substrats*', 19 p., 1993.
- [15] 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, 2006.
- [16] 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.
- [17] M. Comtois et M. Legaré, '*La Fertilisation des Plantes Ligneuses Cultivées en Contenant*', Institut Québécois de Développement de l'Horticulture Ornementale, 57 p., 2004.
- [18] M. Soumaré, A. Demeyer, F.M.G. Tack and M.G. Verloo, '*Chemical Characteristics of Malian and Belgian Solid Waste Composts*', Bioresource Technology, Vol. 81, N°2, pp. 97 – 101, 2002.
- [19] J.G. Fuchs, U. Galli, K. Schleiss and 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.
- [20] B. Leclerc, '*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), 2^{ème} édition, 2001.
- [21] P. Levasseur et C. Aubert, '*Contexte, Atouts et Faiblesses des Effluents Porcins et Avicoles Destinés à Etre Exportés*', ESA d'Angers, Vol. 29, N°2, 9 p., 2006.
- [22] ADEME, '*Les Energies 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'Energie (Adème), Mission Energie de la Chambre d'Agriculture du Doubs, 2 p., 2006.
- [23] P. Pouech, '*Principales Caractéristiques des Digestats*', Journée Technique Nationale, 'Réussir un Projet de Méthanisation Associant des Déchets Ménagers Agricoles et Industriels', 7 Octobre 2008, 6 p., Adème, France, 2008.
- [24] P. Vanai, '*Valorisation Agronomique d'un Compost Urbain Produit par Méthanisation: Etude en Milieu Tropical*', Thèse de Docteur en Sciences de l'Université Française du Pacifique (UFP), Spécialité Chimie, 172 p., 1995.
- [25] M. Annabi, '*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., 2005.
- [26] 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.
- [27] Y. M'Sadak, A. Ben M'Barek and L. Tayachi, '*Possibilités d'Incorporation du Méthacompost Avicole dans la Confection des Substrats de Culture à Base de Compost Sylvicole en Pépinière Forestière*', Revue Nature et Technologie, Vol. 06, pp. 59 – 70, 2012.
- [28] www.univ-chlef.dz/RevueNatec/art_06_08.pdf