

Valorisations environnementale, énergétique et agronomique de la biométhanisation industrielle appliquée à la biomasse avicole récupérée en Tunisie

Y. M'SADAK¹, A. BEN M'BAREK¹

(Reçu le 31/03/2015; Accepté le 30/11/2015)

Résumé

Le présent travail consiste à étudier la fermentation méthanique, appliquée aux fientes avicoles, établie au niveau du digesteur pilote industriel de Hammam Sousse (Tunisie). Le suivi analytique de ce digesteur a porté, d'une part, sur la détermination de certaines caractéristiques de l'effluent avicole par l'analyse des paramètres physico-chimiques et environnementaux, et d'autre part, sur le suivi énergétique par l'appréciation de la productivité qualitative du biogaz produit. En outre, la présente étude s'est intéressée à la substitution partielle du Compost Sylvicole Brut (CSB), produit localement, par le méthacompost avicole. Le suivi a porté sur la germination et la croissance des plants d'*Acacia cyanophylla*. Au terme de l'expérimentation mise en œuvre, les meilleurs bilans de dépollution quant au digestat liquide sont obtenus au niveau du bassin de décantation. L'intérêt du recours à l'épuration du biogaz a été démontré en comparant les résultats avant et après épuration tant sur le plan composition gazeuse que sur le plan pouvoir calorifique. 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.

Mots-Clés: Digesteur industriel, fientes avicoles, bilans de dépollution, composition gazeuse, pouvoir calorifique, méthacompost avicole.

Abstract

This work consists on the study of the methanic fermentation, applied to the chicken manure, at an industrial pilot digester of Hammam Sousse (Tunisia). The analytical monitoring of the digester has focused on the one hand, on the determination of certain characteristics of the chicken effluent by the analysis of the physicochemical and environmental parameters, and on the other hand, on energy monitoring by assessing the qualitative productivity of the produced biogas. Furthermore, the present study focused on the partial substitution of the Gross Sylvicole Compost (CSB), produced locally, by the chicken methacompost. The agronomic evaluation of the chicken methacompost was based on *Acacia cyanophylla* germination and plant growth. Upon completion of the experiment, the best assessments of the depollution on the liquid digestate are obtained at the setting basin. The interest of purification of the biogas was shown by comparing the results before and after purification in terms of gaseous composition and calorific value. The incorporation of chicken methacompost with the CSB has a remarkable positive effect on germination, and consequently, on the growth of the seedlings, in terms of height and diameter.

Keywords: Industrial digester, chicken manure, depollution balances, gaseous composition, Calorific value, chicken methacompost.

INTRODUCTION

L'augmentation de la quantité des déchets ne cesse de s'accroître en Tunisie, comme partout dans le monde. La valorisation des déchets devient de plus en plus d'une grande nécessité à l'échelle locale et planétaire (Essabri et El Omari, 2012).

Les Gouvernements tunisiens sont constamment à la recherche de solutions technologiques permettant un traitement efficace et moins coûteux des déchets. 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 de richesses (Van Den Berg, 1982; Saidi et Abada, 2007). C'est un processus biologique complexe assurant une technologie de gestion efficace de la biomasse (Hess, 2007;

Afilal *et al.*, 2010; M'Sadak *et al.*, 2012; Essabri et El Omari, 2012; Afilal *et al.*, 2013; M'Sadak *et al.*, 2013; Afilal *et al.*, 2014; M'Sadak et Ben M'Barek, 2014; M'Sadak *et al.*, 2015; M'Sadak et Ben M'Barek, 2015). 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 particulièrement intéressantes à utiliser quand elles sont produites en quantités importantes et régulières (Tou *et al.*, 2001) et surtout lorsqu'elles sont traitées par biométhanisation avant utilisation (Verrier *et al.*, 1982; Beline et Gac, 2007; Macias-Corral *et al.*, 2008).

¹ Département du Génie des Systèmes Horticoles et du Milieu Naturel Institut Supérieur Agronomique de Chott-Mariem, Université de Sousse, Tunisie. msadak.youssef@yahoo.fr

La fermentation méthanique est aujourd'hui la filière bioénergétique aux perspectives les plus prometteuses (Schievano *et al.*, 2008; Holm-Nielsen *et al.*, 2009) pour produire du biogaz. 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 (Moletta, 1989). Le biogaz occupe une position stratégique afin de relever les défis liés à l'approvisionnement énergétique (Essabri et El Omari, 2012).

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 (Brondeau *et al.*, 1982; Angelidaki et Ellegaard, 2003; Westerman et Bicudo, 2005; Essabri et El Omari, 2012). Le bon fonctionnement (dépollution, potentialité énergétique) de ce type de procédé est largement conditionné par les conditions physico-chimiques (nature, pH, MS, ...) des substrats mis en fermentation.

La présente étude vise essentiellement une évaluation des performances environnementales et énergétiques du digesteur pilote industriel (alimenté par des fientes avicoles fraîches après leur dilution) installé à Hammam Sousse (Tunisie), en se limitant à un suivi physico-chimique restreint et à la détermination de son bilan de dépollution (Matières En Suspension: MES et Demande Biologique en Oxygène: DBO₅) et de sa productivité qualitative du biogaz (Composition en Biométhane: % CH₄ et Pouvoir Calorifique: PC). Elle repose aussi sur une détermination de principales interventions possibles au niveau de l'installation en vue d'une meilleure production et d'une valorisation optimale des Co-produits de la Biométhanisation (biogaz et digestats).

L'utilisation agronomique des digestats ou résidus (solide et liquide) 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. L'emploi, particulièrement 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 surtout sa qualité chimique, et par conséquent, la qualité des plants forestiers produits. Dans ce cadre, le travail entrepris est orienté spécialement 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. Ainsi, des évaluations directe et indirecte des substrats confectionnés ont été respectivement entreprises, visant essentiellement l'appréciation de leur comportement physico-chimique et du comportement végétatif (germination des semences, 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 mélangé 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 perpétué (MCAA') suivant le même ratio, à raison de 20% dans chaque mélange.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Système expérimental

Présentation technique du digesteur étudié

Il s'agit d'un digesteur industriel pilote de forme cylindrique, 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 (Alcor et Axenne, 2003).

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 4 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 (Photo 1), située à proximité des poulaillers, est constituée de:

- Un bassin de collecte pour le mélange des fientes avec les eaux, il est de forme circulaire de 4 m de diamètre et de 24 m³ de capacité. 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, il 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. Il est de forme circulaire et dont le diamètre est 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 biométhanisation, est formé d'un toit ayant la configuration d'un cône pour faciliter le dégagement des gaz. Étant 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.

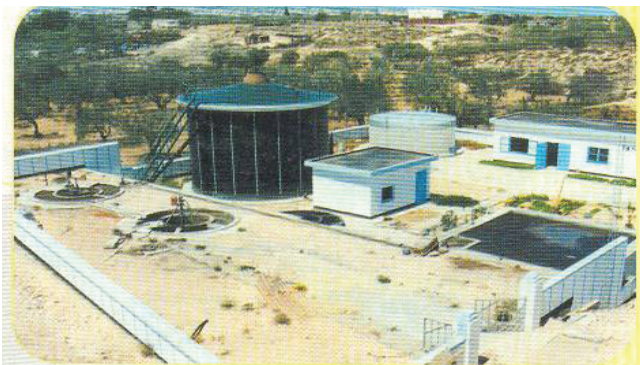


Photo 1: Vue générale de l'installation intégrale de biométhanisation industrielle adoptée

Post-traitement du digestat avicole

Les fientes digérées, produites dans le digesteur, traversent trois bassins différents (Photo 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. À 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 conjointement 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.

Suivi analytique

Considérations générales

Le suivi analytique a porté sur divers paramètres physico-chimiques, environnementaux et énergétiques pendant une période variable entre une à quatre semaines en fonction de performances de digestion relevées. Les analyses physico-chimiques et environnementales effectuées ont été limitées à celles faisables au laboratoire « Biogaz » du Centre de Formation Professionnelle Agricole en Élevage Bovin (CFPAEB) de Sidi Thabet, Tunisie.

Les prises d'échantillons des fientes avicoles ont été faites à trois différents points de l'installation industrielle de biométhanisation (bassins d'avant et d'après fermentation et entrée du bassin de décantation) correspondant successivement à trois phases du processus de fermentation : avant, au cours et après digestion,

et ceci afin d'établir les bilans d'évolution de certains paramètres physico-chimiques étudiés tout le long de l'expérimentation, ainsi que les bilans de dépollution. De plus, un prélèvement des fientes fraîches a été effectué à partir d'un poulailler afin d'apprécier l'humidité initiale des fientes avant raclage.

Quant aux analyses qualitatives de biogaz, elles ont été réalisées aux laboratoires d'analyses relevant de la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR) de Bizerte.

Les prélèvements du biogaz ont été accomplis avant et après épuration afin d'apprécier l'importance de la désulfuration du biogaz produit vis-à-vis des potentialités énergétiques (% méthane, pouvoir calorifique).

Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques suivis se sont limités aux deux paramètres ci-après.

pH

Le pH constitue une mesure globale des ions hydrogène à l'aide d'un pH-mètre. On admet que le pH est le premier indicateur du mauvais fonctionnement éventuel d'un digesteur. La digestion anaérobie se déroule de façon optimale au voisinage de la neutralité ($\text{pH } 7,2 \pm 0,5$). Mais, elle est généralement possible entre pH 5 et pH 9. Une baisse de pH traduit la teneur en Acides Gras Volatils (AGV), non ionisés, et par conséquent, les phénomènes d'inhibition sur les microorganismes (Moletta, 1989).

Taux de Matière Sèche

Le taux de matière sèche (MS) est le taux complémentaire du degré d'humidité. Il s'agit ainsi de déterminer le degré ou taux d'humidité qui n'est autre que le pourcentage d'eau dans la matière considérée à l'aide d'un séchage à l'étuve.

Paramètres environnementaux

Le suivi environnemental a été limité aux deux paramètres ci-après.

Matières En Suspension

Les Matières En Suspension (MES) correspondent à l'ensemble de particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée (Ramade, 1993). L'estimation de ce paramètre fait appel à trois étapes: filtration, séchage et pesage. Ainsi, l'échantillon est filtré sur fibre de verre sous vide ou sous pression et séché à l'étuve à 105°C. Le résidu déposé sur le filtre est pesé et les résultats sont exprimés en mg/l.

Demande Biologique en Oxygène

La Demande Biologique en Oxygène (DBO_5) constitue un bon indicateur de la teneur en MO biodégradables d'une eau (toute MO biodégradable polluante entraîne une consommation d'oxygène) au cours des procédés d'autoépuration. Le principe de la mesure de la DBO_5

repose sur la quantification d'O₂ consommé après incubation de l'échantillon durant 5 jours.

La méthode de mesure de la DBO₅ consiste en l'incubation de l'échantillon du substrat en présence de solutions salines, d'une solution de phosphate et d'Allyl Thio Urée (ATU) pendant 5 jours, à l'obscurité et à 20°C. Les résultats sont exprimés en mg d'O₂/l.

Suivi qualitatif de la productivité gazeuse

L'évaluation de la productivité gazeuse impose les suivis quantitatif et qualitatif du gaz produit au niveau du digesteur industriel. Suite au dysfonctionnement du débitmètre installé, le suivi quantitatif n'a pas pu être effectué et on s'est limité uniquement au suivi qualitatif qui a porté sur le biogaz prélevé, une fois inflammable, en déterminant sa composition gazeuse et son pouvoir calorifique tout en appréciant la capacité épuratoire du procédé adopté.

Composition en éléments gazeux

La qualité du biogaz est évaluée essentiellement par la mesure du % méthane (CH₄) qu'il contient. En effet, un biogaz est d'autant meilleur que son % méthane est élevé. Mais, elle repose aussi sur la détermination du % dioxyde de carbone (CO₂), % sulfure d'hydrogène (H₂S) et % hydrogène (H₂). Par opposition au méthane, plus les % de ces éléments sont réduits, plus la qualité du biogaz produit est meilleure.

Pour l'analyse de la composition gazeuse, on a eu recours à la technique de Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG) qui consiste à séparer les molécules d'un mélange très complexe de nature et de volatilité très diverses. Cette technique est convenable pour les composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Les composants déterminés par cette méthode sont les suivants: % Méthane (CH₄), % CO₂, % H₂S et % H₂. L'appareil ORSAT a permis de mesurer les pourcentages en volume du CO₂ et de l'oxygène (O₂). Le détecteur de gaz DRÄGER a servi pour la détermination des teneurs en H₂S.

Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 m³ Normal de gaz sec (quantité de matière gazeuse qu'occupe 1m³ dans les conditions normales de température et de pression : 0°C sous 1 Atmosphère) dans l'air à une pression absolue constante.

Il s'agit d'évaluer le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) et le Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) exprimés en (kcal/Nm³) et liés par la relation suivante:

$$\text{PCS} = \text{PCI} + \text{Chaleur latente de vaporisation}$$

Le PCI est l'énergie calculée lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état de vapeur. L'eau formée pendant la combustion est ramenée à l'état liquide, les autres produits étant à l'état de gaz. Ainsi, la chaleur latente de vaporisation est celle nécessaire pour transformer 1kg d'eau en vapeur.

Potentialités de valorisation agronomique hors sol du méthacompost avicole

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 (Tunisie).

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 (Lamhamedi *et al.*, 1997; Ammari *et al.*, 2003). 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 la

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

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 8 mélanges, tout en substituant partiellement le CSB par l'un ou l'autre des MCA étudiés (% volume). Les mélanges testés sont répartis en deux catégories présentées dans le Tableau 1.

Les substrats mis à l'évaluation directe (caractérisation physico-chimique) sont au nombre de 5: 3 substrats purs considérés (CSB, MCAA, MCAA') et 2 meilleurs mélanges (M1, M2) confectionnés à partir de trois constituants purs considérés.

Les substrats expérimentés indirectement (caractérisation agronomique) sont limités à:

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.

Évaluation physico-chimique des substrats étudiés

Appréciation de la qualité physique

Le test standard de porosité (CPVQ, 1993) permet d'estimer les trois porosités ci-après et 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 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 (CPVQ, 1993) 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 x 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.

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 trop de problèmes (Morard, 1995).

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 (Lamhamedi et al., 1997).

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:

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 (CPVQ, 1993).

- Matière organique

Le % 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.

- 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 MO, sous l'action des micro-organismes, se décompose pour donner de l'humus. Plus de 50% de la MO est constituée de carbone C, lequel est utilisé par les microorganismes. Ces derniers utilisent 1 kg d'azote pour chaque 30 kg de carbone (CPVQ, 1993).

- 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 Ca, plus le système racinaire est intact. Sa teneur est déterminée selon la méthode de dosage par spectrophotométrie à flamme.

Suivis agronomiques des plants installés

Biotest de germination sur 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 (Bernal *et al.*, 2009). 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 (Juste *et al.*, 1985; Goyal *et al.*, 2005) des plantes-tests cultivées en conteneurs remplis du CSB produit à la pépinière. Pour chaque espèce végétale, on a utilisé 4 conteneurs (soit 15 cavités x 4 conteneurs x 2 espèces = 120 plantes-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.

Évaluation du comportement des plants

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

- Pourcentage de germination des semences

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

Le suivi de l'évolution de la partie aérienne des plants a été conduit à partir des mesures en cm (à 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

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 5 plants homogènes (5 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

Il est égal au rapport Hauteur/Diamètre (H/D), exprimé en cm/mm.

Le dispositif expérimental mis en œuvre 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: 2 conteneurs x 3 substrats x 3 blocs.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Suivi de certaines conditions physico-chimiques de la Biométhanisation

Évolution du pH

La Figure 1 montre les fluctuations du pH, mesuré une seule fois, au cours du processus de fermentation méthanique.

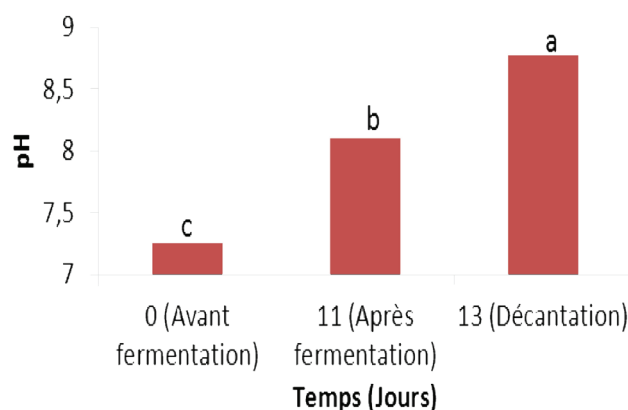


Figure 1: Évolution du pH au cours du processus de biométhanisation

Le bassin de mélange ou bassin d'avant fermentation, présente un pH d'environ 7,2 quant aux deux bassins d'après fermentation, ils présentent des valeurs assez élevées qui varient d'un pH de 8, dans le premier bassin recevant les fientes digérées, à un pH assez alcalin égal 8,8 dans le bassin de décantation.

Seule la valeur observée du pH au niveau du bassin de mélange est conforme avec les recommandations (pH $7,2 \pm 0,5$). Pour les autres bassins, ils sont aménagés à l'air libre et leur exposition aux aléas climatiques (en particulier, les pluies) pourrait contribuer aux variations remarquables du pH. Par ailleurs, la basification observée pourrait surtout provenir de l'accumulation d'ammoniac dans les fientes digérées liée à la dégradation anaérobie de la matière organique. Le fait que la concentration augmente dans le décanteur suggère que la dégradation de la matière organique n'est pas intégrale dans le digesteur et qu'elle se poursuit sur les effluents avicoles traités au cours de leur stockage.

Évolution de la matière sèche

Selon la théorie, la concentration en MS des fientes de volailles dans un digesteur ne devrait pas dépasser 10%. Au-delà de cette valeur, la matière est dense et provoque rapidement l'arrêt de la fermentation méthanique (Akrou, 1992).

La variation des % MS à différents points de l'installation est montrée sur la Figure 2.

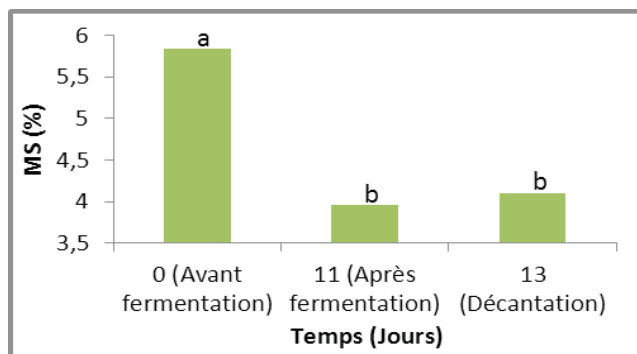


Figure 2: Évolution de la MS à différents niveaux de l'installation

L'ajustement du % MS à une valeur inférieure à 10% est une étape primordiale et très exigeante pour un meilleur déroulement du processus de fermentation puisque les fientes avicoles fraîches présentent au départ un taux de MS égal à 20,9%. Le raclage de ces fientes avec le jus de process permet de les diluer pour obtenir un taux de MS aux alentours de 6% juste avant fermentation. La circulation des fientes raclées et leur mélange avec les fientes déjà respectivement digérées et décantées dans les autres bassins permet de réduire davantage ce taux de MS. La chute du taux de MS pourrait être également expliquée par la dégradation de la MO par les microorganismes au cours de la fermentation.

Après digestion, il n'existe pas des différences nettes entre les valeurs enregistrées dans le bassin des fientes digérées et dans la phase liquide du décanteur. Une faible augmentation d'environ 0,2% a été enregistrée à ce niveau.

Établissement des bilans de dépollution

Résultats relatifs aux matières en suspension

L'évolution du taux des MES au cours de différentes phases de fermentation est décrite par la courbe représentée sur la Figure 3.

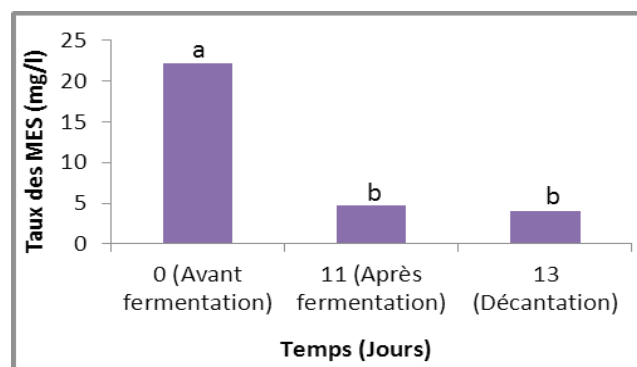


Figure 3: Évolution des MES au cours de la fermentation

Les MES sont en baisse continue tout au long du cheminement du substrat, ce qui pourrait s'expliquer par la bonne biodégradation de la MO (une réduction supérieure à 80% des MES au niveau du bassin de décantation). Cette biodégradation est largement due au système de digestion pratiqué, à cellules fixées, faisant appel à 6000 briques de 12 disposées en superposition et qui permet une bonne rétention des MES à l'intérieur du digesteur pouvant accentuer à terme l'instaurance du colmatage.

Résultats relatifs à la DBO₅

La Figure 4 montre la variation des valeurs de la DBO₅ au cours de différentes phases de Biométhanisation.

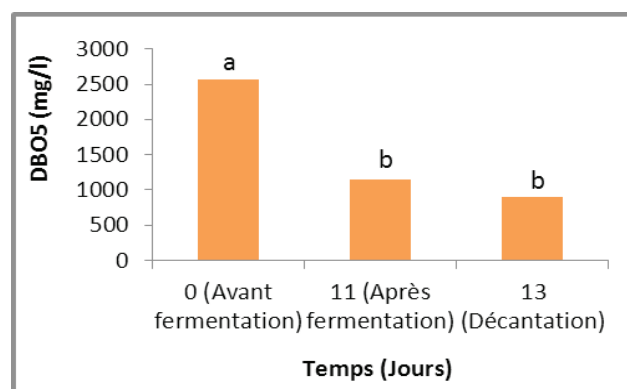


Figure 4: Évolution de la DBO₅ au cours de la fermentation

La courbe d'évolution spatio-temporelle de la DBO₅ est pratiquement superposable à celle des MES, ce qui permet de dégager les mêmes constatations. Les résultats correspondants montrent une réduction de la charge polluante dépassant 55% dans les deux cas. Cette potentialité est plus accentuée au niveau du bassin de décantation avec une différence de l'ordre de 6% par rapport au bassin des fientes digérées. La décantation de la matière digérée favorise donc la réduction de la charge polluante. Ce qui fait que cette étape est très intéressante et les résultats sont encourageants pour donner plus d'importance au maintien en état de fonctionnement du bassin de décantation. Notons que le fait que la DBO₅ dans le décanteur soit plus faible que celle relevée à la sortie du digesteur va dans le sens que la dégradation de la MO se poursuit dans le décanteur.

Importance énergétique de l'épuration du biogaz produit

Le biogaz produit par le digesteur industriel subit l'épuration en faisant appel à une désulfuration avec l'hématite de fer. À cet égard, le suivi a été réalisé avant et après épuration pour apprécier l'intérêt de ce traitement. L'évaluation de la performance du conditionnement réalisé est interprétée à partir des résultats d'analyse de la composition du biogaz et de son pouvoir calorifique.

Impact de l'épuration sur la composition gazeuse

La Figure 5 illustre la variation de la composition gazeuse du produit avant et après épuration. L'épuration consiste à éliminer non seulement les éléments traces comme

la vapeur d'eau, l'hydrogène sulfuré, les composés halogénés, mais aussi le gaz carbonique, afin d'enrichir la concentration en méthane.

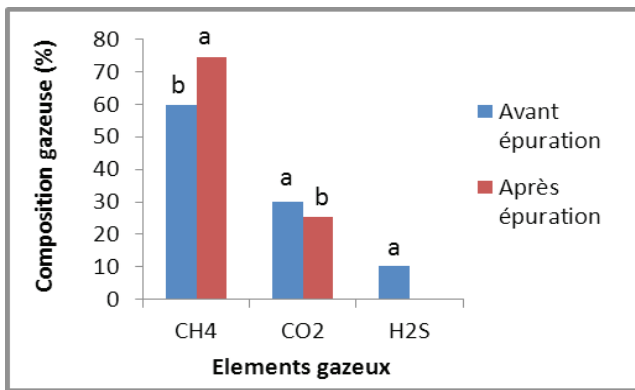


Figure 5: Effet de l'épuration sur la composition du biogaz produit

D'après les résultats obtenus, le % CH₄ a largement augmenté de 15% après épuration, alors que les % CO₂ et % H₂S, au contraire, ont diminué le premier de presque 5% et le deuxième de 10%. Notons que le biogaz est d'autant meilleur que son pourcentage en méthane est élevé et que les autres constituants sont réduits autant que possible.

Les résultats obtenus sont des indices du bon fonctionnement du procédé d'épuration et de la grande importance du traitement du biogaz, puisqu'il assure mieux une réduction en éléments polluants (CO₂ et H₂S) ainsi qu'une intensification en concentration CH₄.

Impact de l'épuration sur le pouvoir calorifique

Les résultats correspondant aux PCI et PCS du biogaz produit avant et après épuration sont relatés dans le Tableau 2 ci-après.

Tableau 2: Variation du PC du biogaz avant et après épuration

	PCI (kcal/Nm ³)	PCS (kcal/Nm ³)
Avant épuration	5110	5684
Après épuration	6389	7106

Après épuration, il y a une nette amélioration du pouvoir calorifique. On peut dire que le biogaz industriel produit présente des potentialités énergétiques valables avant et après épuration. La valorisation énergétique du biogaz peut être une source pertinente de revenus pour amortir l'investissement initial (Trigui, 2008) puisque le biogaz est converti en pratiquement toutes les formes utiles d'énergie (Pahl *et al.*, 2008; Charles *et al.*, 2009; Rao *et al.*, 2010). Elle permet à la ferme d'acquérir une autonomie en combustible pour la production de chaleur et, si l'installation comporte une unité de production d'électricité, de réduire les coûts de son achat et éventuellement d'expédier les surplus sur le réseau (Karellas *et al.*, 2010; Poeschl *et al.*, 2010)

Néanmoins, il convient d'améliorer davantage le rendement d'épuration du biogaz pour atteindre le maximum théorique égal à 8500 kcal/Nm³ (Monzambe, 2002)

En définitive, l'incidence relevée de l'épuration du biogaz par de l'hématite ferrique sur la teneur du biogaz en CH₄ et donc sur son PCI devrait être considérée avec prudence. En l'absence de répétition des mesures, on peut dire aussi que ce résultat est probablement lié aux incertitudes de mesure ou à la variabilité intrinsèque de composition du biogaz dans le temps.

Résultats relatifs à l'évaluation physico-chimique des substrats

Résultats de porosité

Les résultats relatifs aux paramètres de porosité considérés sont regroupés dans le Tableau 3.

Résultats relatifs aux substrats purs

En se référant aux résultats obtenus (Tableau 3.a), on peut dégager les constatations essentielles ci-après.

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

- Le CSB est caractérisé par une Pt et une Pa importantes

Tableau 3: Récapitulatif des résultats moyens de porosité relevés

Substrats	Porosité totale Pt (%)	Porosité d'aération Pa (%)	Porosité de rétention Pr (%)
a- Résultats moyens relatifs aux substrats purs			
CSB	77,5	46,6	30,9
MCAA	70,6	12,1	58,5
MCAA'	67,3	11,2	56,1
b- Résultats moyens relevés pour le mélange CSB et MCAA			
80% CSB + 20% MCAA	67,4	23,9	43,5
70% CSB + 30% MCAA	62,5	18,0	44,5
60% CSB + 40% MCAA	58,2	16,3	41,9
50% CSB + 50% MCAA	56,2	13,8	42,4
c- Résultats moyens relevés pour le mélange CSB et MCAA'			
80% CSB + 20% MCAA'	70,5	21,7	48,8
70% CSB + 30% MCAA'	65,2	18,0	47,2
60% CSB + 40% MCAA'	62,4	15,1	47,3
50% CSB + 50% MCAA'	58,5	13,7	44,8

et une Pr relativement acceptable. Ses particules grossières favorisent la Pa, et par conséquent, il est considéré comme substrat aérateur.

- Le MCAA et le MCAA' 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.

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 optimisation physique.

Résultats relatifs aux mélanges considérés

Les Tableaux 3.b et 3.c évoquent la variation des porosités Pt, Pa et Pr suivant les mélanges réalisés. L'analyse du Tableau 3.b relatif 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 % Pa qui sont assez faibles.

Pour le cas du mélange CSB avec MCAA', illustré dans le Tableau 3.c, les quatre mélanges répondent aux normes pour la Pt et la Pr.

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

On a retenu les deux mélanges 80% CSB + 20% MCAA (M1) et 80% CSB + 20% MCAA' (M2) comme meilleurs substrats de point de vue propriétés physiques pour le suivi de la germination et de 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 (Lemaire *et al.*, 1989).

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.

Comportement chimique

Toutes les valeurs relevées représentent la moyenne de trois répétitions de chaque substrat mis à l'essai. Le Tableau 4 ci-après récapitule les résultats obtenus pour chaque substrat testé et pour chaque paramètre chimique considéré.

L'analyse des résultats des analyses chimiques permet de dégager les constatations ci-après.

- Les valeurs du pH de différents substrats testés sont élevées. Seul le CSB présente une valeur acceptable, inférieure à 7,5.

- Les mesures de la CE montrent une légère salinité induite par les produits organiques (MCAA et MCAA') et qui présentent les valeurs les plus élevées. Leur mélange avec le CSB permet de réduire sensiblement les valeurs obtenues de plus de 1g/l. Notons que le niveau de salinité atteint demeure non néfaste 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 son origine) a été incorporé à faible volume.

- 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 PK 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 considérablement la composition chimique du CSB en ces éléments, et par conséquent, une telle pratique aurait certainement une incidence sur la fréquence de fertigrations actuellement adoptées.

Tableau 4: 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

Résultats relatifs aux suivis agronomiques

Biotest de germination des légumineuses

Un suivi de la germination des semences d'haricot et de 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 5.

Tableau 5: Résultats du biotest de germination

Plantes-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 (Sullivan *et al.*, 2001).

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 (Hoitink *et al.*, 1997). Les possibilités d'utilisation des composts sont prometteuses, mais restent fortement tributaires de leur aspect qualitatif.

Suivi de germination des semences d'Acacia cyanophylla

La Figure 6 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.

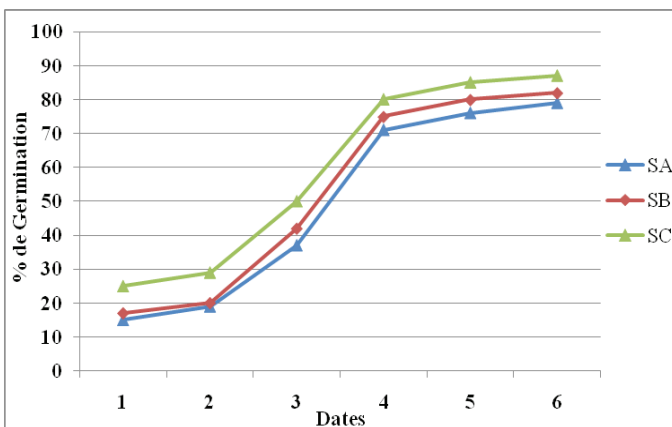


Figure 6: Variation de la cinétique de germination de semences d'Acacia

On peut distinguer trois phases:

-Une phase de latence, nécessaire à l'apparition des premières germinations qui se prolonge quatre 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.

Accroissement en hauteur des plantules d'Acacia cyanophylla

La Figure 7 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 x 3 blocs = 30 plants/substrat.

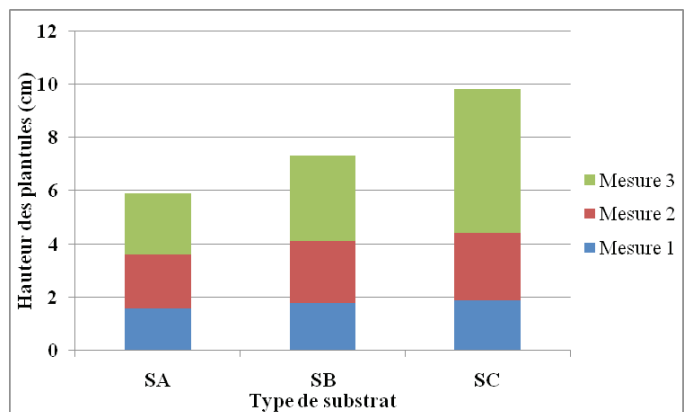


Figure 7: Variation de la hauteur moyenne en cm de plants d'Acacia

Selon Lamhamedi *et al.* (1997), 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.

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.

Accroissement en diamètre des plantules d'*Acacia cyanophylla*

Selon Lamhamedi *et al.* (1997), les plants ayant un gros diamètre possèdent souvent des racines latérales bien développées. Le diamètre au collet est le meilleur paramètre de prédiction de la survie.

L'évolution du diamètre des plants d'*Acacia* est illustrée sur la Figure 8 ci-après. Cette évolution correspond à la moyenne de 30 mesures spécifiques au diamètre pour chaque substrat.

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.

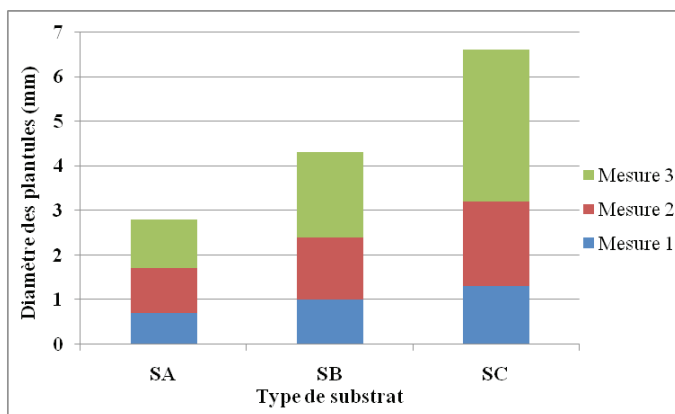


Figure 8: Variation du diamètre moyen en mm de plants d'*Acacia*

Ratio de robustesse

Les résultats relatifs à ce paramètre sont représentés sur la Figure 9.

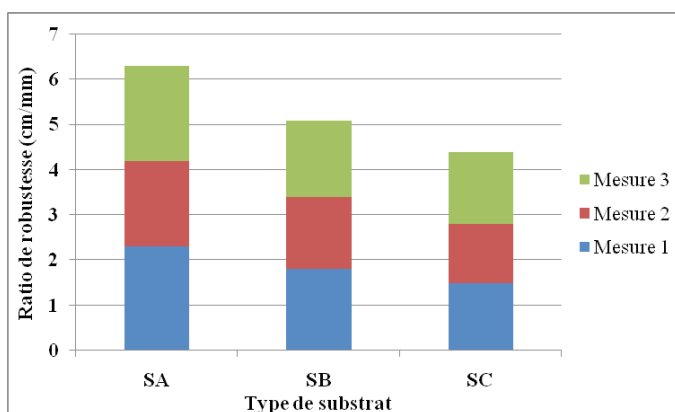


Figure 9. Variation du ratio de robustesse de plants d'*Acacia*

Le but de ce contrôle est d'atteindre un format de plant idéal en hauteur, diamètre et ratio de robustesse.

Selon les normes citées par Lamhamedi *et al.* (1997), 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.

CONCLUSION

Dans l'ensemble, le travail entrepris a porté sur l'exploitation des Co-produits issus de la Biométhanisation pilote de fientes de volailles dans le Contexte Tunisien, notamment la valorisation énergétique du biogaz et la valorisation organique des digestats notamment solides. Cette exploitation conjugue protection de l'environnement et développement durable.

Les suivis environnemental et énergétique, menés au niveau du digesteur pilote industriel à Hammam Sousse, ont permis de justifier les potentialités environnementales et énergétiques du biogaz produit.

À partir de différents points de l'installation présentant, entre autres, les différentes phases du processus de Biométhanisation industrielle, un suivi analytique a porté sur deux conditions physico-chimiques de fonctionnement (pH et MS) depuis le bassin de mélange jusqu'au décanteur. Les valeurs obtenues ne respectent pas toujours les normes de fonctionnement normal d'un tel digesteur.

Le biogaz subissant une étape d'épuration qui a permis, dans les conditions expérimentales considérées, d'améliorer davantage respectivement le % méthane et le PCI en passant de 60 à 75% et de 5110 à 6389 kcal/Nm³. Un tel résultat mérite d'être confirmé en ayant recours à d'autres investigations répétées temporellement.

En analysant les résultats du suivi des paramètres environnementaux (MES et DBO₅), on constate que les courbes d'évolution de ces deux paramètres suivent pratiquement la même allure tout le long du procédé de Biométhanisation. Les meilleurs bilans de dépollution déduits sont relatés au décanteur au niveau duquel la réduction de la charge polluante des MES est évaluée à 80,5% et pour la DBO₅, elle est de l'ordre de 62%. Les résultats relevés relatifs à la capacité épuratoire du procédé expliquent que l'installation contribue autant à la dépollution des fientes avicoles.

Quoique, l'installation a besoin de quelques modifications en vue d'améliorer davantage son efficacité en matière de performances environnementales et énergétiques, par exemple, l'installation d'un système de chauffage ou bien en vue d'améliorer l'intérêt financier (rentabilité) du projet en valorisant mieux les quantités de digestats produits (méthacompost comme fraction solide et jus de process comme fraction liquide). À cet égard, le compostage de la biomasse végétale (déchets sylvicoles) et la Biométhanisation de la biomasse animale (fientes avicoles) constituent une solution de rechange face à l'utilisation du terreau forestier ou agricole et aux importations massives de la tourbe.

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 ci-après.

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

- Les MCAA et MCAA' ne peuvent pas être considérés également 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 souvent 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 mélange du CSB avec MCAA ou MCAA' est appréciée à travers l'amélioration, l'équilibre et la correction effectués concernant particulièrement 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 une légère augmentation du taux de germination des semences d'*Acacia cyanophylla* 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 montré 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 présenté une supériorité nette en matière d'évolution des plants en hauteur et en diamètre, par contre, les ratios de robustesse sont globalement inférieurs à ceux des plants cultivés sur le CSB (substrat standard).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement tous les organismes impliqués dans ce travail qui n'a été possible que grâce à la participation de la Société Avicole Frères Mhiri localisée à Hammam Sousse, Tunisie et du Centre de Formation Professionnelle Agricole en Élevage Bovin (CFPAEB) de Sidi Thabet, Tunisie qui ont mis à leur disposition respectivement le digesteur industriel et le laboratoire «Biogaz». Il en est de même pour la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR) de Bizerte qui a contribué aux analyses qualitatives du biogaz produit et pour la Pépinière Forestière Moderne de Chott-Mariem (Sousse, Tunisie) qui a mis à leur disposition les plates-formes existantes de compostage et de culture pour la mise en place des expérimentations agronomiques.

RÉFÉRENCES

- Afilal M.E., Bakx A., Belakhdar N., Membrez Y. (2010). Evaluation of the biogas potential of organic waste in the northern provinces of Morocco. *Rev. Energ. Ren.* 13: 249-255.
- Afilal M.E., Belakhdar N., Daoudi H., Elasri O. (2013). Fermentation méthanique des différents substrats organiques. *J. Mater. Environ. Sci.* 4: 11-16.
- Afilal M.E., Elasri O., Merzak Z. (2014). Caractérisations des déchets organiques et évaluation du potentiel Biogaz. *J. Mater. Environ. Sci.* 5: 1160-1169.
- Akrouit J. (1992). Étude énergétique de la fermentation méthanique des fientes de volailles: Optimisation des facteurs influents et modélisation du système. Doctorat de Spécialité, École Nationale des Ingénieurs de Tunis, Tunisie, 143 p.
- Alcor et Axenne (2003). Étude stratégique pour le développement des énergies en Tunisie. Bilan des réalisations et Rapport final de l'Agence Nationale des Énergies Renouvelables (ANER): 148-157.
- Ammari Y., Lamhamedi M.S., Akrimi N., Zine Elabidine 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'I.N.A.T., Tunisie:* 99-119.
- Angelidaki I., Ellegaard L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Appl. Biochem. Biotech.* 109: 95-105.
- Beline F., Gac A. (2007). La méthanisation: un moyen de valoriser la matière organique des déjections animales et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. SINFOTECH - Les Fiches Savoir-faire, CEMAGREF, 4 p.
- Bernal M.P., Albuquerque J.A., Moral R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology* 100: 5444-5453.
- Brondeau P., De La Farge B., Héduit M. (1982). Un nouveau procédé de fermentation méthanique en continu pour les lisiers: Production d'énergie, dépollution et désodorisation. *Génie Rural* 1-2: 5-10.
- Charles W., Walker L., Cord-Ruwisch R. (2009). Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste. *Bioresource Technology* 100: 2329-2335.
- CPVQ (1993). Pépinière- Culture en conteneurs- Substrats. Conseil des Productions Végétales du Québec, 19 p.
- Essabri E., El Omari H. (2012). Valorisation des déchets de la ville de Settat par fermentation méthanique. *Rev. Microbiol. Ind. San. et Environn.* 6: 164-173.
- 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: 1584-1591.
- Hess J. (2007). Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation. Thèse de Doctorat, Université de Nice- Sophia Antipolis-UFR Sciences, France.
- Hoitink H.A.J., Stone A.G., Hand Y. (1997). Suppression of plant diseases by composts. *HortScience* 32: 184-187.

- Holm-Nielsen J.B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology* 100: 5478-5484.
- Juste C., Solda P., Dureau P. (1985). Test agronomique simple destiné à juger rapidement de la phytotoxicité éventuelle et du degré de maturité d'un compost d'ordures ménagères. Comité "Sols et Déchets" 1973-1983. Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets, Nantes, France, 4 p.
- Karellas S., Boukis I., Kontopoulos G. (2010). Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 1273-1282.
- Lamhamedi M.S., Fortin 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. Projet BIRD 3601 TUN. Rapport technique: Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie ». DGF Tunisie et PAMPEV International, Québec, Canada, 120 p.
- Lemaire F., Dartigues A., Rivières L.M. et Charpentier S. (1989). Culture en pots et conteneurs. Principes Agronomiques et Applications. INRA, Paris, France.
- M'Sadak Y., Ben M'Barek A. (2014). Compared performances of the experimental digesters of the animal biomass. *J. Fundment. Appl. Sci.* 6 (1): 11-30.
- M'Sadak Y., Ben M'Barek A. (2015). Characterization of Co-products of the pilot digesters to animal biomass in Tunisia. *J. Fundment. Appl. Sci.* 7: 185-202.
- M'Sadak Y., Ben M'Barek A., Baraket S. (2012). Diagnostics environnemental et énergétique des digesteurs anaérobies expérimentaux des fientes avicoles. *Revue Nature and Technologie* 7: 81-86.
- M'Sadak Y., Ben M'Barek A., Zoghلامي R.I. (2013). Diagnostics environnemental et énergétique des digesteurs anaérobies expérimentaux des fientes avicoles. *Revue Nature and Technologie* 8 C: 19-26.
- M'Sadak Y., Ghariani I., Ben M'Barek A., Tayachi L. (2015). Qualitative study of solid poultry digestate from an industrial digester installed in Tunisia. *Mor. J. Chem.* 3: 157-166.
- Macias-Corral M., Samani Z., Hanson A., Smith G., Funk P., Yu H., Longworth J. (2008). Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. *Bioresource Technology* 99: 8288-8293.
- Moletta R. (1989). Contrôle et conduite des digesteurs anaérobies. *Revue des Sciences de l'Eau* 2: 265-293.
- Monzambe M. (2002). La problématique de la biométhanisation en République démocratique du Congo. Université du Québec, 38 p.
- Morard P. (1995). Les cultures végétales hors sol. Édition Publications Agricoles AGEN, Paris, France: 9-11.
- Pahl O., Firth A., Mac-Leod I., Baird J. (2008). Anaerobic co-digestion of mechanically biologically treated municipal waste with primary sewage sludge: A feasibility study. *Bioresource Technology* 99: 3354-3364.
- Poeschl M., Ward Sh., Owende Ph. (2010). Prospects for expanded utilization of biogas in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 1782-1797.
- Ramade F. (1993). Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. Édiscience internationale, Paris, France.
- Rao P.V., Saroj Baral S., Dey Ranjan, Mutnuri S. (2010). Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 2083-2091.
- Saidi A., Abada B. (2007). La biométhanisation: Une solution pour un développement durable. *Rev. Energ. Ren.*, Vol. CER'07 Oujda, : 31-35.
- 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: 8112-8117.
- Sullivan D.M., Miller R.O. (2001). Compost quality attributes, measurements, and variability. In: Stofella, P.J. et Kahn, B.A (Eds.). Compost utilization in horticultural cropping systems. Lewis Publishers, New York, USA: 95-120.
- Tou I., Igoud S., Touzi A. (2001). Production de biométhane à partir des déjections animales. *Rev. Energ. Ren.: Production et Valorisation-Biomasse* : 103-108.
- Trigui A. (2008). Étude en vue de l'élaboration d'un plan d'action pour l'utilisation énergétique des sous-produits de l'olivier en Tunisie. PNUD-Tunisie/ANME (33), 88 p.
- Van Den Berg L. (1982). Anaerobic digestion of wastes. *Conservation and Recycling*, Vol. Sp. 1: 5-14.
- Verrier D., Morfaux J. N., Albagnac G., Touzel J. P. (1982). The french programme on methane fermentation. *Biomass* 2: 17-28.
- Westerman P., Bicudo J. (2005). Management considerations for organic waste use in agriculture. *Bioresource Technology* 96: 215-221.