

Exploitations énergétique, environnementale et agronomique de la Biométhanisation rurale bovine en Tunisie

Y. M'SADAK¹, A.BEN M'BAREK¹

(Reçu le 08/07/2014; Accepté le 17/11/2014)

Résumé

La présente étude se propose d'analyser les diverses valorisations possibles de la Biométhanisation rurale appliquée aux déjections bovines. Le diagnostic mis en œuvre a concerné la productivité gazeuse ainsi que certains paramètres de dépollution environnementale, de croissance et de fertigation des plants en pépinière maraîchère. Les résultats préliminaires ont montré que le conditionnement du biogaz rural produit a permis d'améliorer les performances énergétiques relevées. L'utilisation de la tourbe mélangée avec du méthacompost bovin comme substrat de culture a donné des résultats encourageants vis-à-vis de la croissance en hauteur des plants de piment. De plus, le jus de process bovin, dilué à raison de 75% d'eau, a présenté une capacité fertilisante intéressante, en plus de l'absence observée de flétrissement. Cependant, en termes de valorisation environnementale, le processus de Biométhanisation adopté n'a pas permis de réduire la charge polluante des MES et de la DBO₅ de manière satisfaisante.

Mots clés: Déjections bovines, Digesteur rural, Biogaz, Dépollution, Méthacompost bovin, Jus de process bovin.

Abstract

The present study involves the analysis of various possible valuations of rural Biomethanisation applied to the bovine manure. The diagnosis concerned gas productivity and some pollution parameters, plant growth and fertigation in a vegetable nursery. The preliminary results of the study showed that the conditioning of the produced rural biogas has improved its energy efficiency. The use of peat mixed with bovine methacompost as a nursery substrate has shown encouraging results as measured through height growth of pepper plants. In addition, the juice of bovin process, diluted with 75% of water, has showed an interesting fertilizing capacity; with the absence of plant wilting. However, in terms of environmental protection, the process of Biomethanisation does not allow a satisfactorily reduction of pollution load of suspended solids and BOD₅.

Keywords: Cattle Droppings, Rural digester, Biogas, Pollution, Bovine methacompost, Bovine process juice.

INTRODUCTION

Pour faire face à la conjoncture très fluctuante des prix énergétiques et réduire sensiblement la pollution locale et l'effet de serre (Mata-Alvarez *et al.*, 2000; Holm-Nielsen *et al.*, 2009), la prospection et le développement des nouvelles sources d'énergie ont été entrepris depuis longtemps (Dodd *et al.*, 1975; Amigun et Von Blottnitz 2007).

Des nombreuses mesures ont été prises par les pouvoirs publics pour protéger l'environnement et les ressources naturelles. Parmi les solutions adoptées, il y a recours à l'emploi des énergies renouvelables, qui suscitent un intérêt croissant, notamment celles issues de la biomasse (Mbuligwe et Kassenga 2004; Afilal *et al.*, 2007; Schievano *et al.*, 2009; Afilal *et al.*, 2010; Afilal *et al.*, 2013a; Afilal *et al.*, 2013b; Afilal *et al.*, 2014), et particulièrement, le biogaz provenant de la Biométhanisation des effluents agricoles (Tou *et al.*, 2001; Tsai *et al.*, 2004; Ko Han *et al.*, 2008; M'Sadak *et al.*, 2012a; M'Sadak *et al.*, 2012b; M'Sadak et Zoghلامي 2012; M'Sadak *et al.*, 2013).

La Biométhanisation, qui a comme principale vocation la production de biogaz, a montré ces derniers temps d'autres intérêts (Mata-Alvarez *et al.*, 2000; Schievano *et al.*, 2008). Elle constitue aujourd'hui l'une de sources de diversification pour le monde agricole (Holm-Nielsen *et al.*, 2009).

En l'absence d'oxygène (O₂), des bactéries dégradent partiellement la matière organique (MO) (Chynowetha *et al.*, 2002; Karagiannidis et Perkoulidis 2009), ce qui conduit à la formation, d'une part, d'un biogaz composé majoritairement du méthane et valorisé en énergie (Shiralipour et Smith 1984; Callaghan *et al.*, 1999; Inoue *et al.*, 2002), et d'autre part des résidus appelés digestats (Pouech *et al.*, 2005; Saidi et Abada 2007; Tambone *et al.*, 2009; Karellas *et al.*, 2010). Ces Co-produits secondaires peuvent être utilisés à l'état solide (méthacompost) comme partie intégrante des substrats de culture ou être épanchés (Jenkins *et al.*, 1997; Mata-Alvarez *et al.*, 2000; Chynowetha *et al.*, 2002; Gomez *et al.*, 2006; Ward *et al.*, 2008; Holm-Nielsen *et al.*, 2009), comme ils peuvent être

¹ Institut Supérieur Agronomique de Chott-Mariem, BP 47, CP 4042, Université de Sousse, Tunisie. Email: msadak.youssef@yahoo.fr

utilisés directement à l'état liquide (jus de process) comme fertilisant des sols (Amigun et Von Blottnitz 2007; Paavola et Rintala 2008), voire, hors sol.

La présente investigation se propose le diagnostic et l'analyse de certains paramètres déterminants dans l'appréciation des performances énergétiques du biogaz rural produit sur le plan qualitatif (composition gazeuse et pouvoir calorifique), environnementales (charge polluante en Matières En Suspension (MES) et en Demande Biologique en Oxygène (DBO_5) des déjections avant et après fermentation) et agronomiques hors sol (emploi du méthacompost comme substrat de croissance et du jus de process comme fertilisant des plants maraîchers) de la biomasse bovine digérée dans un digesteur rural.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Système expérimental

Le travail entrepris fait partie de l'expérimentation de la Biométhanisation rurale des bouses bovines au niveau du digesteur installé à la ferme rattachée au Centre de Formation Professionnelle Agricole en Elevage Bovin (CFPAEB) à Sidi Thabet, Tunisie. Ce digesteur rural de ferme a été construit vers les années 2000. Il s'agit d'un digesteur pilote enterré (Figure 1) à alimentation manuelle en continu et d'une capacité de l'ordre de 6 m³.

L'installation de Biométhanisation considérée est située à proximité de l'étable, pour faciliter la manutention des déjections bovines. Elle est formée d'une bouche d'alimentation, d'un digesteur souterrain de forme circulaire et d'une fosse de récupération du digestat

(Figure 1). À partir de ce digesteur, le digestat est extrait, dans le contexte expérimental considéré, pour subir un post-traitement de conditionnement faisant appel à une séparation des phases débouchant sur deux fractions, l'une solide exploitée après séchage comme substrat de culture et l'autre liquide utilisée après dilution comme fertilisant en pépinière maraîchère hors sol.

Matériel expérimental

Il s'agit de la Biométhanisation des bouses bovines fraîches produites par les vaches disponibles (comme substrat) et des bouses bovines noires extraites de la fosse septique adoptée (comme inoculum). Deux caractéristiques essentielles de ces deux bouses sont illustrées dans le tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques physico-chimiques des intrants bovins mis à l'essai

Nature de bouses bovines	MS, %	pH
Bouse fraîche	31,5	6,5
Bouse noire	9,4	7,0

Tests d'évaluation mis en œuvre

Signalons que les analyses qualitatives du biogaz produit ont été accomplies dans le laboratoire d'analyses de la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR), localisée à Bizerte, alors que les analyses physico-

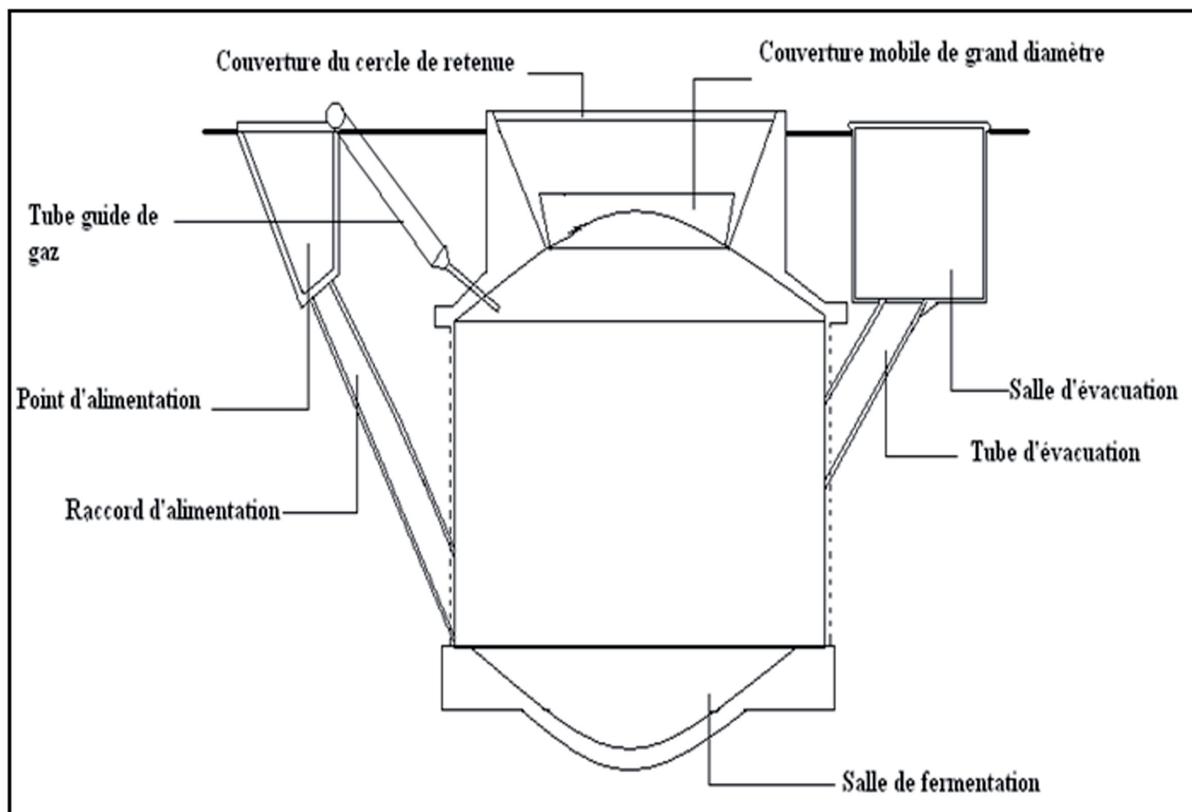


Figure 1: Schéma de principe et composants du digesteur rural de Sidi Thabet (Tunisie)

chimiques (MS, pH) et environnementales (MES et DBO_5) ont été effectuées au laboratoire «Biogaz» du CFPAEB de Sidi Thabet.

Évaluation des performances énergétiques qualitatives du digesteur

L'analyse de la productivité qualitative du biogaz comprend une détermination de la composition du biogaz produit et de son pouvoir calorifique (PC) avec ses limites inférieure et supérieure (PCI et PCS). Le prélèvement de biogaz a été exécuté en faisant appel à un système simple basé sur des prises d'échantillons dans des vessies de ballon.

Pour l'analyse de la composition gazeuse, on a eu recours à la technique de Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG). Cette technique est favorable pour les composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Les composants déterminés par cette méthode sont les suivants: % Méthane (CH_4), % Dioxyde de carbone (CO_2), % Sulfure d'hydrogène (H_2S) et % Hydrogène (H_2).

En outre, on s'est intéressé également au potentiel énergétique, en estimant les valeurs inférieure (PCI) et supérieure (PCS) du pouvoir calorifique, exprimées généralement en kWh/m^3 , kcal/m^3 ou kcal/kg et qui sont reliées par l'expression (1).

$$(1) \text{ PCS} = \text{PCI} + \text{Chaleur latente de vaporisation}$$

Évaluation des performances environnementales du digesteur

Les paramètres environnementaux auxquels on s'est intéressé sont relatifs à la charge polluante en MES et en DBO_5 de la matière digérée provenant de différents mélanges.

Pour les MES, elles correspondent à l'ensemble de particules minérales et/ou organiques présentes dans une eau naturelle ou polluée (Ramade, 1993). Leur détermination permet d'estimer la biomasse bactérienne dans le digesteur (Moletta, 1989). L'analyse repose sur le principe de quantifier toutes les matières pouvant être décantables, après élimination de la majeure partie de l'eau par filtration et évaporation dans l'étuve à 105°C .

Concernant la DBO_5 , ce paramètre constitue un bon indicateur de la teneur en MO biodégradable d'une eau au cours des procédés d'auto-épuration. Le principe de la mesure de la DBO_5 repose sur la quantification de l' O_2 consommé après incubation de l'échantillon durant cinq jours.

Évaluation des potentialités agronomiques des Digestats solide et liquide

Pour le cas du méthacompost, l'évaluation d'une façon directe, en appréciant sa maturité et ses propriétés physiques (porosité totale, d'aération et de rétention) et indirecte, par le suivi des paramètres morphologiques des plants de piment (notamment croissance en hauteur) est nécessaire, afin de mettre au point un substrat adéquat permettant aux plants des conditions optimales de croissance.

Pour le jus de process, son évaluation est limitée à une caractérisation indirecte, réalisée suite à un suivi du comportement végétatif (croissance en hauteur) des plants de piment vis-à-vis de l'arrosage intégral et partiel avec ce résidu liquide.

Concernant la caractérisation de la maturité du méthacompost, il s'agit de réaliser un biotest de germination sur des semences de laitue. Le but du biotest est d'apprécier la maturité du méthacompost, de prévoir l'existence éventuelle de quelques éléments phytotoxiques, tout en mettant en considération la photosensibilité des semences de laitue (Plante-test).

La méthode suivie consiste à mettre, dans des conditions favorables de germination, les graines de laitue. Pour cela, on a utilisé des petits pots en plastique transparents à la lumière, imperméables et hermétiquement fermés. Le méthacompost a subi une légère humidification. On a mis ensuite dans chaque pot 20 graines de laitue et on a pris comme témoin le sable avec trois répétitions pour le méthacompost. Signalons que la maturité de ce résidu solide peut être évaluée, d'après le pourcentage de germination, voire aussi, d'après l'énergie germinative.

La détermination du comportement germinatif (taux de germination et énergie germinative) des plants de laitue a été réalisée à partir des comptages réguliers des plants germés. Les deux paramètres retenus ont été estimés respectivement en ayant recours aux expressions (2) et (3).

$$(2) \text{ Taux de germination} = \left(\frac{\text{Nombre de graines germées}}{\text{Nombre total de graines}} \right) \times 100$$

$$(3) \text{ Energie germinative} = \text{Durée médiane pour atteindre 50\% des graines germées}$$

À propos de l'évaluation de la porosité des substrats de croissance étudiés, elle a été basée sur la maîtrise et la compréhension des structures microscopiques. Notons ainsi qu'à l'échelle microscopique, le substrat est sous forme d'un microsysteme à trois phases; une phase solide composée de particules organiques contenant de l'eau, une phase liquide composée d'eau de rétention et une phase gazeuse composée du vide appelé espace lacunaire contenant des gaz et de la vapeur d'eau. La porosité des substrats est définie comme étant la somme de la phase gazeuse et de la phase liquide. Signalons ainsi que 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 5 à 10 mn environ).

La porosité de rétention (Pr) est déterminée par différence entre la porosité totale et la porosité d'aération. La porosité totale des substrats est généralement supérieure à celle de la terre, qui est de l'ordre de 40 à 50% du volume total (Gras et Aigus, 1982). Les Conditions Tunisiennes exigent les proportions de porosité suivantes: $\text{Pt} \geq 50\%$, $\text{Pa} \geq 20\%$ et Pr

≥30%. Ces règles à appliquer aux substrats 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, à l'aide du Test standard de porosité, sur substrats purs: tourbe et terreau comme substrats de référence et méthacompost. Il convient de noter que chaque test de porosité a été réalisé avec trois répétitions.

Au sujet de l'appréciation de la valeur agronomique du méthacompost et de son aptitude à l'emploi comme substrat de culture à l'état pur ou en mélange, elle est mesurée à l'aide d'un test portant sur le semis des graines du piment. Le méthacompost utilisé lors de cet essai a été prélevé après un temps de séjour de 15 jours dans le digesteur rural, puis séché pendant une période de quatre jours. Trois types de substrats ont été testés qui sont une tourbe pure (témoin), un méthacompost pur et un mélange constitué de 60% tourbe et de 40% méthacompost. Le suivi a porté particulièrement sur le comportement végétatif des plants de piment installés dans des plaques alvéolées, du point de vue croissance en hauteur, tout en relevant les hauteurs cumulées à des intervalles réguliers de quatre jours à partir du 8^{ème} jour après semis.

La capacité fertilisante du jus de process a été appréciée en l'utilisant pour arroser des plantules de piment déjà préparées à l'avance (semées dans des plaques alvéolées sur un même support de référence qui est le terreau) tout en sélectionnant 24 plantules ayant des hauteurs homogènes qui ont servi comme support de l'expérimentation. Ensuite, on a commencé l'arrosage des plantules sélectionnées avec les solutions préparées, à raison d'un arrosage toutes les 48 heures pendant 20 jours, tout en prélevant les mesures de la hauteur cumulée à des intervalles réguliers de quatre jours. Les solutions fertilisantes mises à l'essai sont: l'eau (témoin), le jus de process concentré, ensuite dilué respectivement, à raison de 25% ou de 75%.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Caractérisation qualitative du biogaz produit

Composition gazeuse

La qualité du biogaz produit a été appréciée en faisant apparaître la capacité épuratoire du procédé adopté. Le biogaz produit par le digesteur rural a ainsi subi un conditionnement (simple filtration avec réduction de l'humidité). À cet égard, le suivi a été réalisé avant et après conditionnement pour apprécier qualitativement son importance. L'évaluation de la performance du conditionnement mis en œuvre est expliquée à partir des résultats d'analyses de la composition du biogaz produit (Tableau 2).

Tableau 2: Composition gazeuse du biogaz produit par le digesteur

	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (%)	H ₂ (%)
Avant conditionnement	58	41	Traces	Traces
Après conditionnement	66	33	Traces	Traces

D'après les résultats relevés de la composition du biogaz produit en éléments majeurs (CH₄ et CO₂), le pourcentage de méthane (CH₄) avant conditionnement est proche de la réalité de la biomasse bovine traitée (58%). Ce pourcentage a augmenté de 8% après conditionnement enregistrant ainsi un rendement d'épuration de 13,8%, ce qui montre l'importance du traitement du biogaz, puisqu'il assure davantage une réduction en éléments polluants (CO₂, etc.) tout en augmentant la concentration en CH₄.

Pouvoir calorifique

Les résultats obtenus correspondant aux pouvoirs calorifiques PCI et PCS avant et après conditionnement du biogaz sont indiqués dans le tableau 3.

Tableau 3: Pouvoirs calorifiques du biogaz produit par le digesteur

	PCI (kcal /Nm ³)	PCS (kcal /Nm ³)
Avant conditionnement	4973	5532
Après conditionnement	5210	5932

Concernant les valeurs relevées pour le pouvoir calorifique du biogaz produit, elles donnent une pleine satisfaction quant aux performances énergétiques de la biométhanisation rurale. Elles sont comprises dans l'ensemble dans la fourchette donnée par Mozambe (2002). Selon cet auteur, la valeur calorifique du biogaz est proportionnelle à sa teneur en CH₄ et elle varie entre 5000 et 8500 kcal/m³.

A propos du conditionnement réalisé, ce post-traitement permet d'avoir un rendement d'épuration qui est de l'ordre de 4,8%. Ce rendement est faible en raison surtout du procédé rudimentaire de conditionnement mis en œuvre, certes simple, mais relativement inefficace.

En définitive, il convient d'améliorer encore le rendement d'épuration du biogaz pour rejoindre autant que possible le maximum théorique égal à 8500 kcal/Nm³ (Mozambe, 2002).

Établissement des bilans de dépollution de la charge introduite

Les analyses des MES et de la DBO₅ ont été effectuées sur les deux mélanges initialement et ultérieurement introduits (Tableau 4).

Tableau 4: Suivi de certains paramètres environnementaux

Paramètres suivis	Mélange 1*	Mélange 2**
MES avant fermentation, mg/l	14,0	20,5
MES après fermentation, mg/l	12,0	12,0
Bilan de dépollution des MES, %	11,5	40,4
DBO ₅ début de fermentation, mg d'O ₂ /l	406	573
DBO ₅ fin de fermentation, mg d'O ₂ /l	323	354
Bilan de dépollution de la DBO ₅ , %	20,4	38,0

(*) Mélange 1: Mélange initialement introduit

(**) Mélange 2: Mélange ultérieurement introduit

Le bilan de dépollution des MES comme celui de la DBO₅ augmente en fonction de la concentration de MS introduite dans le digesteur (du premier au second mélange). Les bilans de dépollution obtenus peuvent être considérés comme insuffisants aussi bien en se basant sur les MES que sur la DBO₅ et méritent d'être améliorés surtout pour le cas du mélange initialement introduit.

Évaluation agronomique des digestats

Appréciation de la maturité du méthacompost

Les résultats expérimentaux de germination des semences-tests de laitue sur le méthacompost sont présentés dans le tableau 5.

Tableau 5: Relevés de la germination des graines de laitue sur méthacompost

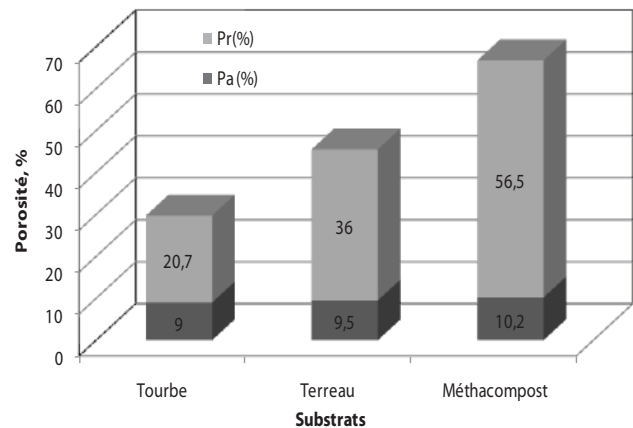
Substrat	Taux de germination, %	Énergie germinative, jours
Sable (Témoin)	82	5
Méthacompost	95	3

Les valeurs acquises de la biogermination des semences de laitue sur le méthacompost utilisé donnent pleine satisfaction, puisque le taux de germination est même plus élevé que celui obtenu sur le sable. De même, l'énergie germinative est meilleure, en termes de rapidité (trois au lieu de cinq jours), ce qui justifie sa bonne maturité.

De ce fait, le méthacompost produit par le digesteur rural, considéré comme mûr, pourrait ainsi servir comme substrat de culture en pépinière hors sol.

Appréciation de la porosité des substrats de croissance testés

La figure 2 relate les caractéristiques physiques, en termes de porosité des substrats purs employés lors du test standard mis en œuvre.

**Figure 2: Porosité de différents substrats purs mis à l'essai**

Pour garantir une bonne production des plants, on doit s'assurer surtout des caractères physiques du substrat de croissance utilisé qui doivent être satisfaites, parce qu'elles jouent un rôle important dans l'alimentation en eau du végétal et dans le fonctionnement des racines: aération et température. Les propriétés physiques concernent essentiellement la porosité du substrat et les teneurs en eau et en air disponibles pour les racines (Morard, 1995). Au sujet des résultats obtenus, on peut constater que les témoins sont loin d'être acceptables de point de vue des porosités totale, d'aération et de rétention. Seul le terreau montre une porosité de rétention acceptable. De tels résultats sont en contradiction avec la littérature, qui considère la tourbe comme étant le substrat idéal pour l'élevage des plants, surtout de point de vue de porosité d'aération. Une telle situation pourrait être due particulièrement à des erreurs de manipulation et/ou de séchage plus ou moins maîtrisé lors de l'exécution du test standard de porosité.

Concernant le méthacompost bovin, ce dernier répond aux normes des porosités totale et de rétention, toutefois, sa porosité d'aération est inacceptable. Devant une telle situation, ce substrat peut être considéré rétenteur et incorporé partiellement avec un substrat aérateur. Le ratio optimal de mélange reste à déterminer ultérieurement avec exactitude.

L'eau peut agir directement par des réactions de dégradation et par des réactions d'hydrolyse. Ces dernières réduisent relativement les dimensions granulométriques du méthacompost. Notons ainsi que la capacité de rétention en eau peut augmenter et la porosité d'aération peut diminuer compte tenu de la finesse des composantes granulométriques du méthacompost.

Le méthacompost issu de la biométhanisation des bouses bovines ne peut être qu'un substrat alternatif partiel à la tourbe et/ou au terreau.

Aptitude à l'emploi agronomique du méthacompost comme substrat de culture

Les résultats du suivi de la croissance en hauteur des plants de piment cultivés sur tourbe et méthacompost à l'état pur ou en mélange avec la tourbe sont illustrés sur la figure 3.

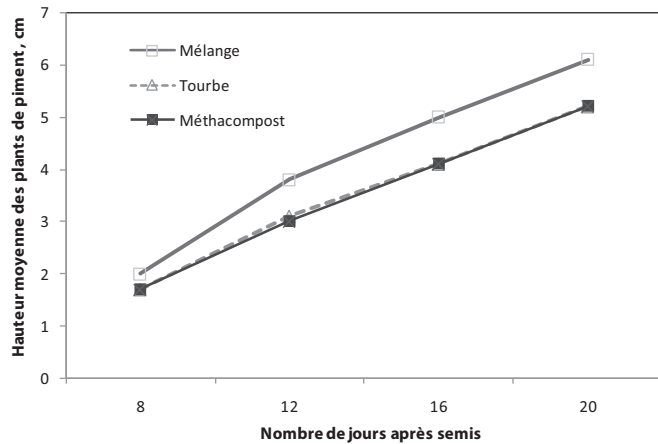


Figure 3: Croissance en hauteur des plants de piment sur différents substrats

Par comparaison entre les différents substrats de culture confectionnés (purs ou en mélange), la croissance en hauteur des plants du piment est presque identique pour les plants installés sur tourbe et sur méthacompost à l'état pur. Mais, les plants installés sur méthacompost ont dévoilé des tiges grêles, sensibles et quelques unes ont été brûlées et ont fini par flétrir. La tourbe incorporée avec du méthacompost (selon un mélange de 60% tourbe et 40% méthacompost) a donné une croissance plus rapide et des hauteurs des plants plus élevées sans présenter des anomalies végétatives.

Ces résultats préliminaires sont fort intéressants (étant donné la possibilité d'incorporation du méthacompost à raison de 40% avec la tourbe) et méritent d'autres investigations avant d'être mis en application (recours futur à la mise en place d'un dispositif expérimental approprié pour le traitement statistique des données relevées).

Aptitude à l'emploi agronomique du jus de process comme fertilisant

Les résultats du suivi de la croissance en hauteur des plants de piment arrosés avec le jus de process, à l'état concentré ou dilué avec l'eau selon différentes proportions sont relatés sur la figure 4.

Le jus de process utilisé à l'état concentré pour l'arrosage des plants de piment a permis une croissance importante en hauteur atteignant 8 cm en 20 jours, mais il faut évoquer que plusieurs plants ont fini par flétrir soudainement. Les mêmes constatations ont été relevées pour l'arrosage avec une solution composée de 75% jus de process et 25% eau, aussi bien de point de vue croissance des plants que flétrissement brusque. Par contre, une solution composée de 25% jus de process et 75% eau, a assuré une bonne croissance des plants produits sans présence d'anomalies de flétrissement.

Dans l'avenir, de tels résultats méritent d'être confirmés en testant conjointement le rapport de dilution 1/2, afin d'étudier la potentialité de fertilisation liquide des plants avec ce dernier rapport. En outre, il convient aussi d'adopter un dispositif expérimental adéquat pour analyser statistiquement les résultats acquis.

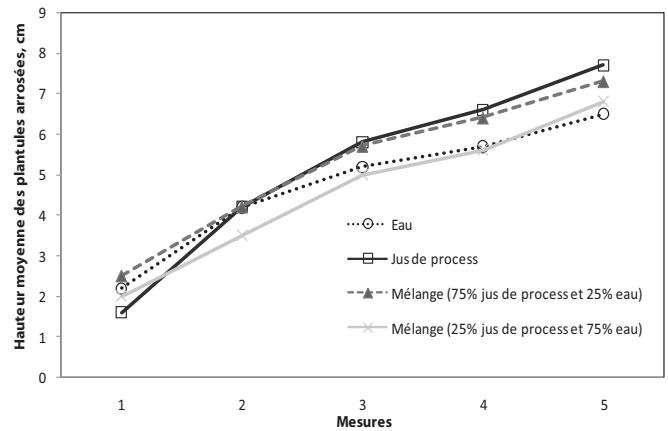


Figure 4: Test de croissance des plants de piment arrosés avec diverses solutions fertilisantes

CONCLUSION

Les déjections animales sont particulièrement intéressantes à utiliser, quand elles sont produites en quantités importantes et régulières et surtout lorsqu'elles sont traitées biologiquement par Biométhanisation avant utilisation, objet essentiel de la présente investigation.

À la lumière des résultats acquis à propos des valorisations énergétique, environnementale et agronomique hors sol de la bouse bovine traitée dans un digesteur rural de ferme alimenté en continu, on a pu tirer particulièrement les enseignements ci-après:

- La caractérisation qualitative du biogaz rural a montré un intérêt certain du post-traitement par conditionnement, enregistrant ainsi une qualité acceptable sur les plans composition gazeuse et pouvoir calorifique. En effet, le conditionnement mis en œuvre a permis d'améliorer en partie les potentialités énergétiques (% Méthane et PC) sans que la capacité épuratoire du procédé soit suffisante.
- Les suivis des MES et de la DBO₅ ont montré que la Biométhanisation permet une réduction de la charge polluante qui prend plus d'importance avec l'accroissement de la concentration en MS de la matière à fermenter, prouvant ainsi que la Biométhanisation est un procédé très bénéfique, en termes de valorisation énergétique et de recyclage de la MO pour la préservation de l'environnement. Cette diminution est considérée comme réduite et nécessite une consolidation, vu que les bilans de dépollution relevés sont faibles à relativement valables dans les conditions expérimentales considérées.
- Le méthacompost bovin testé ne peut pas être perçu comme un bon substrat de croissance à cause de sa porosité d'aération insuffisante, ce qui justifie son mélange, selon des proportions adéquates, avec la tourbe qui a une porosité d'aération normalement plus élevée, en vue d'une correction de l'équilibre physique des substrats de croissance confectionnés.

- Les essais réalisés ont montré que l'utilisation de la tourbe en mélange avec du méthacompost à raison de 40% comme substrat de culture, s'avère très encourageante et performante vis-à-vis de la croissance en hauteur des plants du piment. Le recours au méthacompost comme substitut partiel à la tourbe ou au terreau dans la confection des substrats de croissance pourrait constituer une alternative intéressante pour limiter les importations, et par conséquent, l'hémorragie des devises.

- Les solutions fertilisantes préparées à partir du jus de process bovin ont présenté des pouvoirs fertilisants attirants, en particulier, celui dilué à 75% d'eau. Néanmoins, les résultats obtenus ne sont qu'exploratoires et ils méritent d'être considérés avec prudence, en raison notamment de quelques anomalies végétatives observées dans le cas de la fertigation à base des jus de process concentrés (de 75 à 100%).

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement le Centre de Formation Professionnelle Agricole en Elevage Bovin (CFPAEB) de Sidi Thabet, Tunisie pour la fourniture gracieuse de ses Co-produits de Biométhanisation rurale bovine (Biogaz, méthacompost et jus de process) et la mise à leur disposition de son digesteur pilote de ferme, de son laboratoire «Biogaz» et d'un local pour réaliser les divers tests agronomiques hors sol. Il en est de même pour la Société Tunisienne des Industries de Raffinage (STIR) de Bizerte qui a contribué gratuitement à la réalisation des analyses qualitatives du biogaz produit (composition gazeuse et pouvoir calorifique).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Afilal M.E., Moncif M., Benyamna A. (2007). Valorisation des déchets organiques par fermentation méthanique. *Revue des Energies Renouvelables: CER'07 Oujda* (2007), p. 9-12. www.cder.dz/download/cer07_2.pdf
- Afilal M.E., Bakx A., Belakhdar N., Membrez Y. (2010). Evaluation of the biogas potential of organic waste in the northern provinces of Morocco. *Revue des Energies Renouvelables* 13:249-255. www.cder.dz/download/Art13-2_5.pdf
- Afilal M.E., Belkhadir N., Daoudi H., Elasri O. (2013a). Fermentation méthanique des différents substrats organiques (Methanic fermentation of different organic substrates). *J. Mater. Environ. Sci.* 4 (1), 2013, p. 11-16. www.jmaterenvirosci.com/Document/vol4/2-JMES-190-2012-Afilal.pdf
- Afilal M.E., Belkhadir N., Merzak Z. (2013b). Biogas Production from Anaerobic Digestion of Manure Waste Moroccan Case. *Global Journal of Science Frontier Research Biological Sciences Volume XIII Issue I, 2013, 3 p.* journalofscience.org/index.php/GJSFR/article/.../636
- Afilal M.E., Elasri O., Merzak Z. (2014). Caractérisations des déchets organiques et évaluation du potentiel Biogaz (Organic waste characterization and evaluation of its potential biogas). *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (4), 2014, p. 1160-1169. www.jmaterenvirosci.com/Document/.../144-JMES-808-2014-Afilal.pdf
- Amigun B., Von Blottnitz H. (2007). Investigation of scale economies for African biogas installations. *Energy Conversion and Management* 48, p. 3090-3094. inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN...
- Callaghan F.J., Wase D.A.J., Thayanithy K., Forster C.F. (1999). Co-digestion of waste organic solids: batch studies. *Bioresource Technology* 67, p. 117-122.
- Chynowetha D.P., Owensa J.M., Legrand R. (2002). Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy* 22, p. 1-8.
- CPVQ(1993). Pépinières, Culture en conteneurs, Substrats. Document technique, Conseil des Productions Végétales du Québec, 19 p.
- Dodd V.A., Lyons D.F., Herlihy P.D. (1975). A System of Optimizing the Use of Animal Manures on a Grassland Farm. *J. agric. Eng. Res* 20, p. 391-403.
- Gomez X., Cuetos M.J., Cara J, Moran A., Garcia A.I. (2006). Technical Note Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy* 31, p. 2017-2024.
- Gras R., Aigus I. (1982). Quelques propriétés physiques des substrats horticoles. *PHM Revue Horticole*, p. 51-53.
- Holm-Nielsen J.B., Seadi T., Oleskowicz-Popiel P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology* 100, p. 5478-5484. top25.sciencedirect.com/.../bioresource-technology/...
- Inoue S., Tsukahara K., Sawayama S. (2002). Analysis of Effluent after Anaerobic Digestion of Liquid Phase Separated from Liquidized Garbage. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 93 (6), 2002, p. 607-609.
- Jenkins B.M., Kayhanian M., Baxter L.L., Salour D. (1997). Combustion of Residual Biosolids From a High Solids Anaerobic Digestion/Aerobic Composting Process. *Biomass and Bioenergy* 12 (5), 1997, p. 367-381.
- Karagiannidis A., Perkoulidis G. (2009). A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. *Bioresource Technology* 100, 2009, p. 2355-2360. www.researchgate.net/.../222316083_A_multi-criteria...
- 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, 2010, p. 1273-1282. www.deepdyve.com/.../development-of-an-investment...
- Ko Han J., Ki Kim Y., Hyeon Kim T., Chi Kim N., Umeda M. (2008). Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure. *Waste Management* 28, 2008, p. 813-820. yadda.icm.edu.pl/.../bwmeta1.element.elsevier-f65358...
- Mata-Alvarez J., Mace S., Llabres P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology* 74, 2000, p. 3-16.

- Mbuligwe S.E., Kassenga G.R. (2004). Feasibility and strategies for anaerobic digestion of solid waste for energy production in Dar Essalaam city, Tanzania. *Resources, Conservation and Recycling* 42:183-203.
- Moletta R. (1989). Contrôle et conduite des digesteurs anaérobies. *Revue des Sciences de l'Eau* 2, 1989, p. 265-293. <https://www.mysciencework.com/.../controle-et-conduite-des-digesteurs-...>
- Morard P. (1995). Les cultures végétales hors sol. Édition Publications Agricoles AGEN, Paris, p. 9-11.
- Mozambe M. (2002). La problématique de la biométhanisation en République Démocratique du Congo. Université du Québec, 38 p.
- M'Sadak Y., Ben M'Barek A., Zoghalmi R.I., Baraket S. (2012a). Caractérisation quantitative et qualitative de la productivité énergétique de digesteurs pilotes de déjections animales- *Revue de génie industriel*, Numéro 7, Janvier 2012, p. 46-55. <http://www.revue-genie-industriel.info>
- M'Sadak Y., Ben M'Barek A., Baraket S. (2012b). Suivis physico-chimique et énergétique de la Biométhanisation expérimentale appliquée à la biomasse bovine. *Revue Nature & Technologie*, Numéro 7, Juin 2012, p.81-86. http://www.univ-chlef.dz/RevueNatec/Art_07_10.pdf
- M'Sadak Y., Zoghalmi R.I. (2012). Caractérisations physico-chimique, environnementale et énergétique de la Biométhanisation industrielle avicole en Tunisie semi-aride- *Algerian Journal of Arid Environment (AJAE)*, Vol. 2 No 2, Décembre 2012, p.16-27. www.univ-ouargla.dz/Pagesweb/PressUniversitaire/doc/.../E020202.pdf
- M'Sadak Y., Ben M'Barek A., Zoghalmi R.I. (2013). Diagnostics environnemental et énergétique des digesteurs anaérobies expérimentaux des fientes avicoles. *Revue Nature & Technologie*, Numéro 8 (C), Janvier 2013, p.19-26. www.univ-chlef.dz/revuenatec/Art_08_C_03.pdf
- Paavola T., Rintala J. (2008). Effects of storage on characteristics and hygienic quality of digestates from four co-digestion concepts of manure and biowaste. *Bioresource Technology* 99, 2008, p. 7041-7050. [yadda.icm.edu.pl/.../bwmetal.element.elsevier-73423...](http://www.yadda.icm.edu.pl/.../bwmetal.element.elsevier-73423...)
- Pouech P.H., Coudure R., Marcato C.E. (2005). Intérêt de la Co-digestion pour la valorisation des lisiers et le traitement de déchets fermentescibles à l'échelle d'un territoire. *Journées Recherche Porcine* 37, 2005, p. 39-44. www.journees-recherche-porcine.com/texte/2005/05Env/env0506.pdf
- Ramade F. (1993). Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. Édiscience Internationale de Paris, 822 p.
- Saidi A., Abada B. (2007). La Biométhanisation: une solution pour un développement durable. *Rev. Energ. Ren.: CER'07 Oujda*, p. 31-35. www.cder.dz/download/cer07_7.pdf
- 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, 2008, p. 8112-8117. www.researchgate.net/.../5411213_Predicting_anaero...
- Schievano A., D'Imporzano G., Adani F. (2009). Substituting energy crops with organic wastes and agro-industrial residues for biogas production. *Journal of Environmental Management* 90, 2009, p. 2537-2541. www.hindawi.com/journals/tswj/2014/303858/ref/
- Shiralipour A., Smith P.H. (1984). Conversion of biomass into methane gas. *Biomass* 6 (1-2), 1984, p. 85-92.
- Tambone F., Genevini P., D'Imporzano G., Adani F. (2009). Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. *Bioresource Technology* 100, 2009, p. 3140-3142.
- Tou I., Igoud S., Touzi A. (2001). Production de Biométhane à partir des Déjections Animales. *Rev. Energ. Ren.: Production et Valorisation-Biomasse*, p. 103-108. http://www.cder.dz/download/bio_17.pdf
- Tsai W.T., Chou Y.H. and Chang Y.M. (2004). Progress in energy utilization from agrowastes in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8, 2004, p. 461-481. [yadda.icm.edu.pl/.../bwmetal.element.elsevier-55078...](http://www.yadda.icm.edu.pl/.../bwmetal.element.elsevier-55078...)
- Ward A.J., Hobbs P.J., Holliman P.J. and Jones D.L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology* 99, 2008, p. 7928-7940. www.researchgate.net/.../Optimisation_of_the_anaero...