

« Valorisation des déchets liquides issus des industries d'exploitation de sisal d'Amboasary Sud par biométhanisation »

J.M. Tolojanahary¹, B. Randrianjaka¹, T.Fanjirindratovo², S.C Manjovelo², P.R
Fatiany², Dr A.D. Razafindrakanakolona ³, Dr M.M. Rakotoarivelo⁴

¹Doctorant Domaine Science et Technologie à l'Université de Toliara

²Domaine Science et Technologie, Université de Toliara

³ Institut des Sciences et Techniques de l'Environnement Fianarantsoa

⁴ EAD 6 EDT Sciences Humaines et Sociales, Université d'Antananarivo

Correspondant: jmtolojanahary@gmail.com

Résumé

Dans ce travail, nous avons entrepris une série d'expériences, pour caractériser et fermenter le jus de sisal. 22,5 litres de biogaz a été récolté pendant une durée de fermentation de deux jours d'un litre de substrat, dont 79 % de méthane dans le cas d'une digestion du jus traité de 10 % de rumen, et 52 % pour le jus brut. Ce qui permet d'estimer que les 112 948 m³ de jus disponible annuellement peuvent produire 2 541 336 m³ de biogaz équivalent à 19, 8 GWh le cas de jus traité avec 10% de rumen, pouvant substituer 5 337 tonnes de bois de chauffage, soient 2 643 tonnes de charbon de bois, 2 064 m³ de gasoil et 2 140 d'essence. A l'état brut du substrat, on obtient une puissance de 13,16 GWh.an⁻¹, équivalent à 3 532, 5 tonnes de bois de chauffe, soient 1 771 tonnes de charbon de bois, 1 372 m³ de gasoil et 1 423 m³ d'essence. Ce travail ouvre de nouveaux horizons pour la recherche d'une alternative au développement dans le monde rural, et propose une source d'énergie renouvelable permettant à la fois, une meilleure gestion des déchets organiques, la production du gaz inflammable, et aussi une boue fertilisante comme amendement.

Mots-clés : biogaz, déchet organique, digestat, digestion anaérobie.

Abstract

In this work, we undertook a series of experiment, to characterize and ferment sisal juice. 22,5 liters of biogas have been harvested during 2 days of one liter substratum fermentation which 79% of methane in juice digestion been about 10% of rumen, and 52% for the raw juice. What permits to estimate that 112 948 m³ of available juice can produce 2 541 336 m³ of biogas annually, equivalent to 19, 8 GWh for treated juice with 10% of rumen, capable to substitute 5 337 tons of fuel wood, 2643 tons of vegetable charcoal, 2 064 m³ of diesel and 2 140 of gas. The raw substratum give a power of 13,16 GWh.year⁻¹, equivalent to 3 532, 5 tons of fire-chamber wood, 1 771 tons of vegetable charcoal, 1 372 m³ of diesel and 1 423 m³ of gas. The exploitation will save 0,3% of oil

yearly imports mottos and avoid 3697 to 5 562 tons of CO₂ broadcast. This work opens new horizons toward an alternative of development in the rural area, and proposes a source of renewable energy allowing a better management of the organic waste, the production of the flammable gas and also a fertilizing mud for the amendment of soils.

Keywords: Biogas, Organic waste, Digestat, Anaerobic digestion.

Introduction

Les sept industries sisalières d'Amboasary Sud exploitent plus 20 000 hectares de champs de sisal. Elles exportent plus de 6 500 tonnes de fibres par an, une production nécessitant 218 890 tonnes des feuilles de sisal, 2 030 m³ de gasoil, plus de 570 000 m³ d'eau. L'activité évacue plus de 680.000 m³ de déchets liquides, et 200.000 tonnes de déchets solides. Les eaux usées issues des industries sont directement déversés dans la nature, et dans le fleuve de Mandrare, sans traitement. Elles menacent la biodiversité terrestre et aquatique. Aucune filière organisée de valorisation, même artisanale, ni traitement approprié n'est disponible pour le moment quoique celles-ci augmentent exponentiellement.

Une unité industrielle, la ZEMA, a été créée en 1982 dans la ville d'Amboasary pour fabriquer de l'engrais biologique à partir des déchets de sisal issus du défibrage. Cette initiative de l'Etat a échoué car le produit commercialisé était trop cher pour la quantité d'unités fertilisantes qu'il contient, et le projet fut abandonné. A côté des nuisances olfactive et visuelle, il y a la formation des lacs artificiels, et l'acidification de la nappe phréatique. Leur abondance déborde de la région, et crée des polluants. Une forte biodégradation libre sans contrôle se produit et touche directement à l'environnement. Celle-ci contribue à l'émission des gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, ...), amenant une pollution de l'atmosphère (YU et *al.*, 2002). Cette situation complexe engendre d'importants risques sanitaires aux populations environnantes. A côté des risques écologiques, c'est aussi une perte économique pour la société.

Pour toutes ces raisons, le développement de solutions alternatives et curatives adaptées à ce contexte local est urgent en valorisant ces déchets par biométhanisation. L'objectif fixé dans cette recherche est l'optimisation des paramètres qui influent sur la digestion anaérobie afin de produire du biogaz, et de minimiser les dégâts environnementaux dus à l'exploitation.

I- Matériels et méthodes

1-1-1. Sites d'étude et choix de l'échantillon

Notre étude s'est faite dans les sept industries d'exploitation de sisal bordant les rives du fleuve de Mandrare dans la commune d'Amboasary sud, Région Anosy. Des

champs de plantation de sisal y couvrent plus de 20 000ha. L'exploitation évacue des déchets liquide et solide, non traités ni valorisés, sous d'autres formes, et versés dans le fleuve de Mandrare. Le choix de l'échantillon réside sur la disponibilité de ces déchets dans le temps et dans l'espace.



Figure 1: Champ de culture et déchet liquide de sisal à Berenty Amboasary Sud

Evaluation des déchets disponibles

Pour obtenir des informations fiables autour de la filière sisal, des enquêtes ont été réalisées dans les sept industries où l'étude a été effectuée. La méthode d'enquête est basée sur l'approche de Méthode Accélérée de Recherche Participative qui s'est divisée en trois étapes. La première étape consiste à des entretiens avec les sept exploitants de sisal dans les zones d'exploitation à propos leurs surfaces cultivées, le rendement, les gasoils consommés pour l'exploitation, les déchets et les problèmes autour de la filière. La seconde étape consiste à des entretiens auprès des autorités locales afin mieux assimiler les enjeux socio-économiques et environnementales de l'exploitation sisalière. La dernière étape est basée sur l'observation directe dans les différentes zones d'exploitation et de culture, dans le but de valider la cohérence des informations obtenus auprès des exploitants et des autorités locales.

1-1-2. Mise en disposition des matériels nécessaires

1-1-2-1. Substrat de fermentation

Notre substrat est le jus issu du défibrage de l'*Agave sisalana* appelé communément : sisal. C'est une plante de la famille des Agavaceae originaire de l'Est du Mexique, dont la classification botanique est la suivante :

Tableau I: Classification botanique de sisal cultivé à Amboasary Sud

Règne :	Plantae	Ordre :	Liliales
Sous-règne :	Tracheobionta	Famille :	Agavaceae
Division :	Magnoliophyta	Genre :	Agave
Classe :	Liliopsida	Espèces :	Sisalana
Sous-classe :	Liliidae	Nom vernaculaire :	Taretra ou Laloasy

Nous avons prélevé 10 litres de jus de sisal issu de l'industrie de défibrage à Berenty, dans la même journée de la coupe. Les échantillons sont conservés dans un glaceur lors du voyage Amboasary Sud à Toliara. Une fois arrivée au laboratoire du CREADÉ Toliara, les échantillons sont conservés à 4°C avant leur utilisation. Ils ont été ensuite caractérisés en vue de déterminer leur taux de matière sèche (MS), matière organique (MO) et leur taux en matière minérale (MM).

Pour ce faire, une quantité M_0 connue du substrat a été introduite dans un étuve maintenu à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante M_1 . Après cela, on a calciné la masse M_1 à 600°C dans un four jusqu'à un poids constant M_2 pendant plus de 6 heures (Apha, 1998).

$$\%MS = \frac{M_1}{M_0} * 100$$

$$\%MO = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100$$

$$\%MM = \frac{M_2}{M_1} * 100$$

b) Inoculum

Dans cette expérience, nous avons pris l'eau résiduaire de l'abattoir de Befanamy Toliara composé majoritairement de rumen de bovidé comme inoculum. Le rumen a été choisi en raison de son caractéristique présumé riche en bactéries méthaniques qui se développent naturellement dans les voies intestinales des bovins (Jouany, 1994) (Ynagata, Kamagata, Kawaharasaki, Suzuki, Nakamura, & Minato, 2000). Il est activé en avant en le laissant 6 jours dans un autre biodigesteur.

c) Dispositif expérimental

Nos expérimentations ont été conduites avec un digesteur de 20 litres de type continu. Il est conçu à partir de l'assemblage d'une boîte de peinture de 20 litres, sur sa couvercle perforée fixe une jointe hydraulique formée par l'emboîtement de deux sceaux plastiques dépourvus de leurs bases inférieures. Comme gazomètre, un sceau coupé de sa partie supérieure de surface de base de 444cm² coulisse dans la jointe hydraulique. Son déplacement vertical est référé par un tuyau pvc gradué de 0 à 28cm. A l'intérieur de ce biodigesteur est inséré un garnisseur en bambou, de surface de contact de 5, 12m², servant à fixer les bactéries méthanogènes. La présence de ce garnisseur à l'intérieur du digesteur conduit son volume utile à 14litres. Ce digesteur est muni d'une conduite de biogaz sur laquelle connecte un manomètre à liquide, port d'analyseur de biogaz, et vannes d'arrêt. Il est constitué aussi d'un compartiment d'alimentation du substrat et d'évacuation de digestat servant à alimenter, et à évacuer le réacteur, en même temps, sans ouvrir la cloche gazométrique.

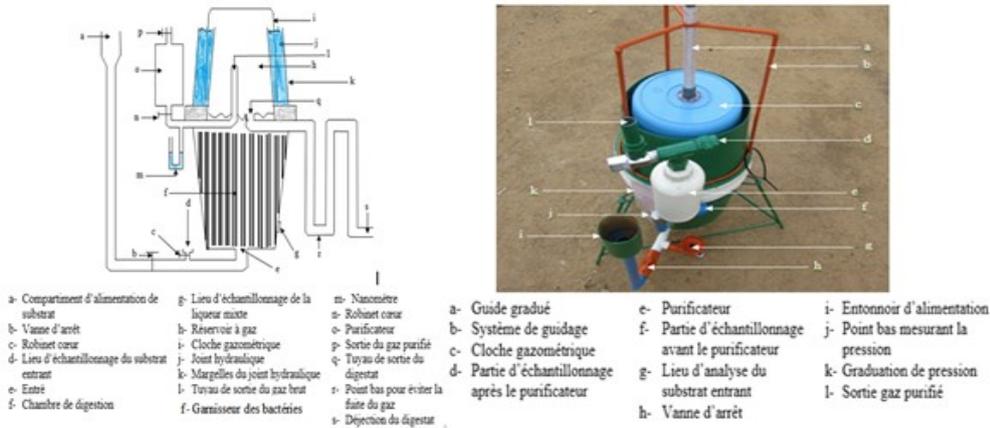


Figure 2: Digesteur expérimental

1-1. Protocole expérimentale

1-2-1. Fixation des bactéries dans le bambou

Nous avons pris 14 litres de ferment matures, et on les a introduits dans le biodigesteur. Les micro-organismes occupent le milieu réactionnel en formant des colonies ou biofilms à la surface des bambous. Il doit y séjourner pendant au moins une semaine, mais, neuf jours pour notre cas, pour être sûr que la surface totale du lit soit vêtue des bactéries.

1-2-2. Quantification et introduction des substrats

La quantification des substrats consiste à mesurer d'abord le substrat à introduire, c'est-à-dire le jus de sisal. Comme le jus est très acide, et que la fermentation méthanique exige une zone optimale située aux alentours de la neutralité, il faut que les microorganismes du réacteur soient adaptés au substrat. Ainsi, on l'a introduit petit à petit afin d'éviter l'intoxication des bactéries. Au début, on a introduit 1 litre de jus de sisal brut de pH 5, 24 ajouté de 10 % de rumen ; s'ensuit la fermeture hermétique du réacteur, la remise à zéro du compteur du gazomètre et de nanomètre. Le chargement s'effectue, en même temps, que l'évacuation d'une quantité équivalente. Nous avons introduit de substrat 9 fois, successivement dont, les trois premiers sont avec 10% de rumen. Les quatre fois qui suivent sont sans rumen tandis que les deux dernières sont faites pour déterminer la quantité de méthane obtenue par unité du substrat. Ceux-ci sont dans le but de trouver le débit de l'alimentation puis la quantité de biogaz obtenu par unité de volume de jus de sisal.

1-2-3. Suivre de l'évolution de la digestion anaérobie

2-6-1-Mesure de pH et de la température

Ces deux paramètres sont mesurés tous les jours à la même heure à l'aide d'un multimètre de type by HANNA muni d'une électrode en verre de précision 0.01. La première étape avant l'utilisation est l'étalonnage de l'appareil à l'aide de deux solutions tampons de pH=4 et pH=7. Après l'étalonnage, on immerge l'électrode dans la liqueur mixte et on lit directement les valeurs stables affichées.

2-6-2-Production journalière du biogaz

Elle est obtenue en multipliant la surface de la base du gazomètre par la hauteur prise par le mouvement vertical ascendant de la guide graduée.

Commentaire [P1]: Cette sous section est trop petite pour bénéficier d'un titre

2-6-3-Composition du biogaz, pouvoir calorifique et équivalence énergétique

Le biogaz est composé majoritairement du méthane et du gaz carbonique et quelques gaz traces (H_2S , H_2 ...). L'absence de matériel sophistiqué nous a obligés à utiliser de matériel Orsat pour déterminer les composantes majoritaires du biogaz dans ce travail. Le principe de cette méthode est la capacité de la solution alcaline, telle que KOH de 40%, d'absorber le gaz carbonique à température ambiante, pour donner de sel soluble K_2CO_3 (Tjalfe & Poulsen, 2003).

L'injection de volume connu du biogaz à l'aide de seringue avec agitation nous permet savoir la teneur en gaz carbonique absorbée. Le restant non absorbé est considéré comme teneur en méthane (Abdel-Hadi, 2008). Le pouvoir calorifique du biogaz produit est obtenu en multipliant la teneur en méthane du biogaz par $9,925kWh/Nm^3$ étant pouvoir calorifique du méthane pur. L'équivalence énergétique du biogaz par rapport à d'autres sources énergétiques est obtenue en divisant le pouvoir calorifique d'un mètre cube de biogaz par celui d'une unité de source d'énergie à comparer (Ramampihirika, 1997).

Tableau II: Pouvoir calorifique inférieur de quelque combustibles

Combustibles	Pouvoir calorifique inférieur
Ethanol	$21.4 \cdot 10^6$ kJ/ Nm^3
Essence	$33.3 \cdot 10^6$ kJ/ Nm^3
Gasoil	$34.5 \cdot 10^6$ kJ/ Nm^3
Charbon de bois	18 804kJ/kg
Méthane	35.874 kJ/ Nm^3

II- Résultats

2-1-2. Résultats de la descente sur terrain

Dans la vallée de Mandrare, on rencontre 7 sociétés d'exploitation de sisal qui font vivre plus de 6 000 ouvriers. Elles consomment plus de 218 890 tonnes de feuilles de sisal par an, et produisent 6 262 à 6 566 tonnes de fibre, nécessitant une quantité de 570 000 m³ d'eau et 2 030 m³ de gasoil par an. Ces sociétés rejettent environ 212 630 tonnes de déchets solides, et 113 710 m³ de jus de sisal, dans la nature. En moyenne, un kilo de feuille de sisal brute donne après défibrage et pressage 0,516 L de jus, de densité 1,08 et de pH 5,57.

Tableau III: Exploitation annuelle de sisal Amboasary sud

Société	SSM	SADP	SADP	SPSM	SAMA	Gallois	HAH
Surfaces cultivés (ha)	3 000	4 000		2 714	2 000	4 500	4 400
Production (t/an)	23 500	46 950		45 100		60 000	43 340
Fibres (t)	705	1 407		1 350		1 500	1 300
Gasoils consommés (m ³ /an)	230	530		400		470	4 00
Déchets solides(t/an)	22 797	45 543		43 750		58 500	42 040
Jus mobilisables (m ³ /an)	12 126	24 226		23 271		30 960	22 363

2-1-4. Résultats expérimentaux

Tableau IV: Caractéristiques du substrat

Constituants	Valeur
Matières sèches	6,5 %
Humidité	93,5 %
Matières organiques	5,37 % de matière brute
Matières minérales	1,13 % de matière brute

La figure 3 illustre les résultats globaux : issus de la fixation des bactéries dans les bambous, suivi des 09 introductions successives de substrat pendant 47 jours d'expérimentation.

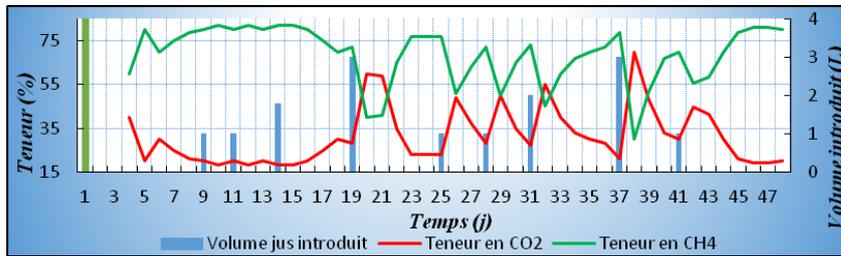


Figure 3:Teneur en (CH₄, CO₂) et volume introduit du substrat dans le temps

Ces résultats peuvent être classés en trois catégories selon le type de fermentation effectué :

- fixation des bactéries (du 1^{er} au 9^e jour) ;
- introduction de substrat à 10 % de rumen (9^e – 19^e jour ;)
- et introduction de substrat brut sans rumen (19^e – 47^e jour).

Le résultat du 37^e jour est une vérification du débit maximal en substrat supporté par le biodigesteur. Celui du 41^{ème} jour est le résultat de la détermination de production volumique en biogaz du substrat.

2-2-1. Fixation des bactéries

Le volume du biogaz stocké dans la cloche commence à augmenter au 4^{ème} jour de l'introduction du rumen. La teneur en méthane du biogaz produit, commence à 60% puis monte jusqu'à 80%. Le volume est maximal aux 5^e et 8^e jours.

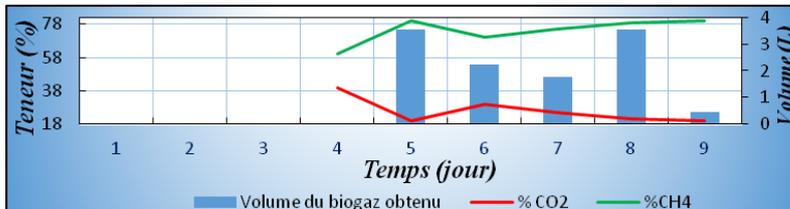


Figure 4:Production de biogaz lors de fixation et maturation des bactéries

2-2-2. Introduction de substrat à 10 % de rumen

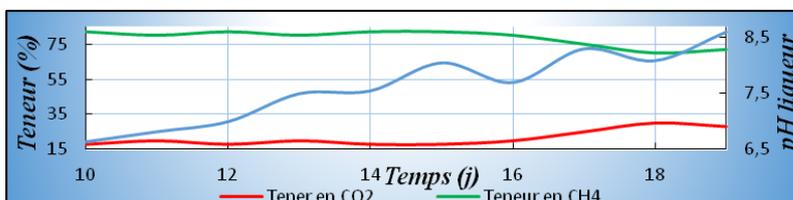


Figure 5:Teneur en (CH₄ ; CO₂) et pH de liqueur mixte dans le temps

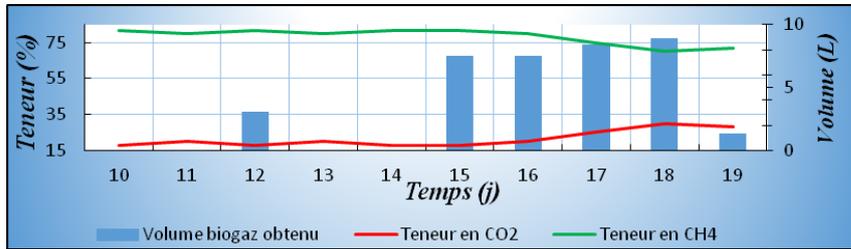


Figure 6:Teneur en (CH4, CO2) et variation de production en volume du biogaz obtenu

2-2-3. Introduction du substrat sans rumen (du 22.04.17 à 20.05.17)

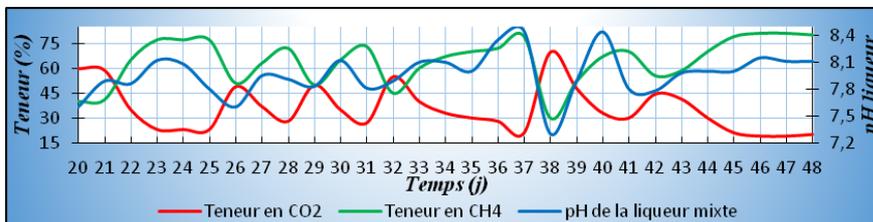


Figure 7:Teneur en (CH4, CO2) et pH liqueur en en fonction du temps

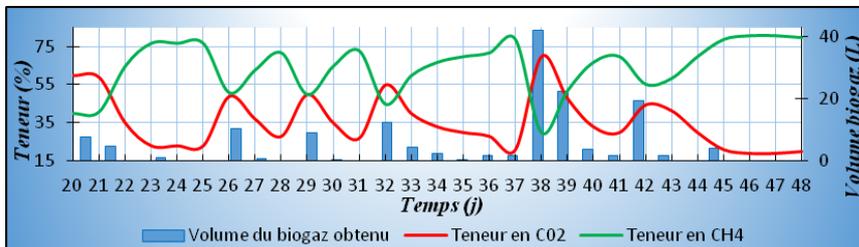


Figure 8:Teneurs en (CH4, CO2) et production en volume dans le temps

2-2-3-1. Introduction de 3 L de substrat brut du 09.05.17

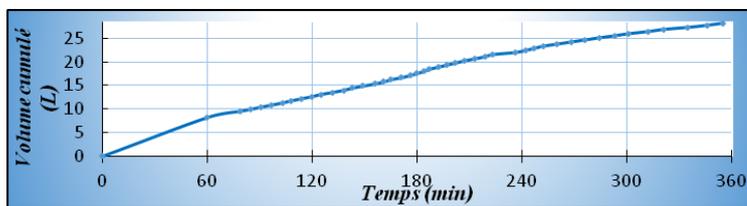


Figure 9:Volume cumulé du biogaz obtenu en fonction du temps

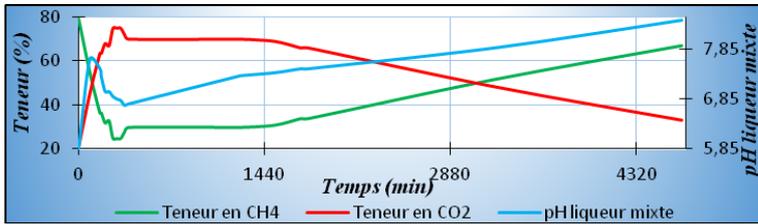


Figure 10:Teneur en (CH4, CO2) et pH en fonction du temps

2-2-3-2. Introduction de 1L de substrat brut du 13 mai 2017 (Annexes 13- b, 13-c)

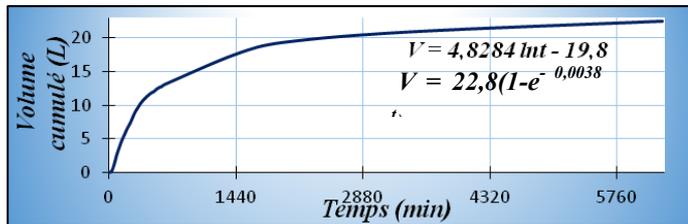


Figure 11:Volume cumulé en fonction du temps

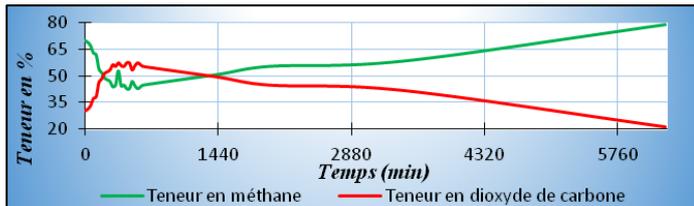


Figure 12:Teneur en (CH4, CO2) en fonction du temps

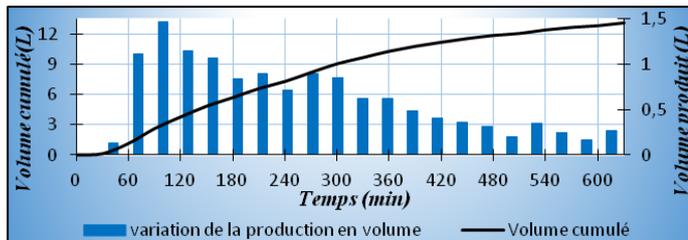


Figure 13:Volume cumulé et production en volume du biogaz dans le temps

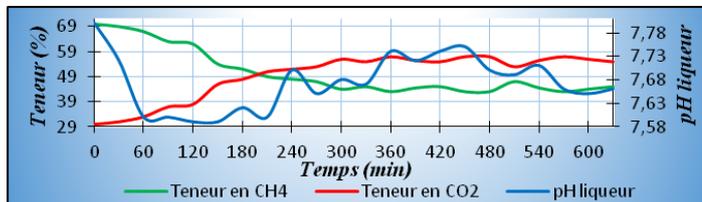


Figure 14:Teneur en (CH4, CO2) et pH de la liqueur mixte en fonction du temps

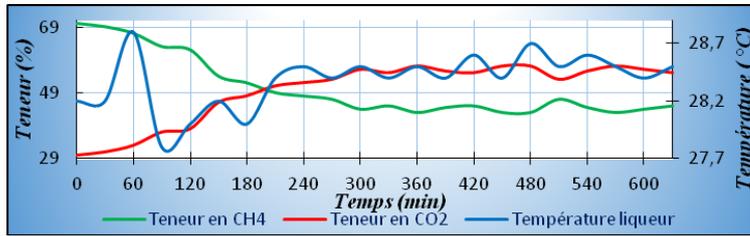


Figure 15: Teneur en (CH₄, CO₂) et températures en fonction du temps

2-1-7-3. Equivalence énergétique des biogaz bruts obtenus

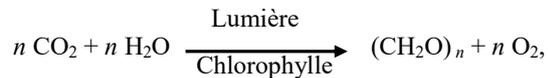
Tableau V: Equivalences énergétique de la totalité des déchets liquide disponible

Combustible	Quantité équivalente par an	
	Substrat à 10% de rumen	Substrat sans rumen
Bois de chauffe	5 337 t	3 532, 5 t
Butane	599 755 m ³	398 990 m ³
Charbon de bois	2 643 t	1 771 t
Essence	2 139,8 m ³	1 423 m ³
Gasoil	2 064 m ³	1 372, 3 m ³

III- Discussions

3-1. Descente sur terrain

D'après ces résultats, seulement 3 % de la biomasse de sisal sont valorisés, et les 97 % restants sont rejetés dans la nature. Ces valeurs correspondent à ceux trouvés par LOCK G. (1969). En outre, le gasoil consommé envoi annuellement 5 480 tonnes de CO₂ dans l'atmosphère. Une valeur obtenu en basant sur une émission de 2, 695 kg de CO₂ par combustion d'un litre de gasoil (ADILCA ; RAMAMPIHERIKA, 2012). Par contre, les 218 890 tonnes de feuilles de sisal disponibles par an séquestrent 403 187 tonnes de CO₂. Cette estimation théorique est basée sur la méthode utilisée par RAMAMPIHERIKA : connaissant le taux en carbone C% de la biomasse et l'équation de la photosynthèse :



la masse M_{CO_2} du gaz carbonique séquestré lors de la production d'une masse M de biomasse est obtenue par la formule :

$$M_{\text{CO}_2} = 3,67 \text{ C \% } M \quad (1)$$

Le taux en carbone de sisal est de 48,3 par rapport à la matière sèche et la teneur en matière sèche est de 14 % (MUTHANGYA et al., 2009). Donc le taux en carbone C% de la matière fraîche est de 6,762 %. La quantité de sisal traité par an est de 218 890 tonnes, alors :

$$M_{CO_2} = \frac{6,76}{100} \times 3,67 \times 218890$$

Soit $M_{CO_2} = 54\,271,6$ tonnes.

Vu que seulement 3 % de biomasse, soit 6 566,7 à 7 000 tonnes de fibre issu de 1 628 t de CO₂ capté, est valorisé (vendu en tant que fibre). Les restes 52 643t de CO₂ sont inexploités, déversés dans la nature sans valorisation sous d'autres formes.

3-3. Caractéristiques du substrat

Les teneurs en eau, en matière sèche, matières organiques et en minérale qui sont respectivement 93,5 %, 6,5 %, 5,37 % et 1,13 % se rapprochent des résultats trouvés par SHIPRA Sharma et al. (2011) qui sont respectivement 93.73%, 6,27%, 4,79% et 1,48%. Le teneur en eau est en effet supérieur à 90%, donc la fermentation méthanique du jus de sisal ne nécessite plus d'eau. Ce qui est compatible avec le district d'Amboasary où l'eau est en péril.

3-5. Résultats de l'expérimentation

3-5-1. Fixation des bactéries

L'adaptation des micro-organismes avec le milieu nécessitera un temps de latence de 5 jours. Au 3^{ème} et 4^{ème} jour, on aperçoit une brusque diminution de pH accompagnée par un accroissement de température interne et c'est là où le taux en CO₂ est maximal. C'est la phase acidogénèse qui est plus acide, exothermique et marqué par l'accumulation de maximale de CO₂ (WHEATLEY, 1990). Ensuite, le taux en CH₄ du gaz produit monte jusqu'à 80 %. Selon la littérature, sur la fermentation du rumen de bovidés, ce taux est compris entre 50 à 70 % (LAGRANGE, 1979). Ainsi, cette augmentation est due à l'auto-optimisation du rapport C/N du milieu. Le rumen riche en azote est combiné avec le bambou qui est riche en carbone et le biogaz obtenu est riche en méthane.

3-5-2. Digestion de substrat à 10 % de rumen

Le jus de sisal ayant un faible taux en azote (1,84 %) mais riche en taux de carbone (SHIPRA Sharma et V.K. VARSHNEY, 2011), était co-digéré avec le rumen de bovidé (riche en azote) à 10 %, afin d'améliorer le rendement en méthane. Le teneur en méthane du biogaz obtenu est, en effet, 78,5 % de moyenne. La co-digestion de genres différents du substrat mène normalement à la synergie de digestion anaérobie produisant un bon

rendement en méthane. Cette synergie se produit quand un substrat supplémentaire contribue des éléments nutritifs essentiels aux besoins de croissance bactérienne, ou dilue l'effet toxique de molécules présentes selon MSHANDETE et al, (2004). L'analyse effectuée par MUTHANGYA M. et al, (2013), indique que le jus et la pulpe de sisal ont relativement un haut contenu du sel et une très petite quantité en protéine (8.83 mg/ml d'azote total). Le taux en azote du jus de sisal est 1,85 d'après SIPRA et al. (2011).

Le rapport C/N est en effet très élevé et ainsi une co-digestion avec un substrat riche en azote sera un atout. MUSA et al. (2014) ont obtenu une amélioration du rendement de sur 60% quand le gaspillage du poisson était co-digéré avec la pulpe du sisal. Il est probable que le rumen, riche en protéines, maîtrise l'accumulation des acides gras du substrat et ceux-ci n'affectent pas le pouvoir tampon du milieu.

3-5-3. Digestion du substrat sans rumen

Nous observons une augmentation de teneur en CO₂ et une diminution de pH, particulièrement, après l'introduction du 19^{ème} jour et 37^{ème} jour. On remarque aussi une petite augmentation de température. Ce sont de phénomènes caractéristiques des phases hydrolyse et acidogénèse, les réactions sont exothermiques (DELFOSSÉ P., 2011). En outre, ces deux particularités montrent que la quantité maximale du substrat brut digérable par le biodigesteur est strictement inférieure à 3 l/j.

La qualité du biogaz obtenu est moyenne avec la teneur moyenne de 50 % en méthane. La grande acidité du substrat est un grand facteur de cette qualité. On rappelle que les quatre communautés de micro-organismes doivent constituer un écosystème équilibré pour que l'essentiel des équivalents réducteurs produits comme déchets au cours de l'anabolisme bactérien, se retrouve finalement dans le méthane. Donc, à pH = 5,45, la plupart des bactéries méthanogènes ont une difficulté d'adaptation. On en déduit alors que le débit maximal est de 1 L j⁻¹.

On note aussi que la production en biogaz est maximale lors des phases acidogénèses. Lors des expérimentations des déchets de sisal effectuées en Tanzanie en 2007, des experts ont remarqué que 70 % du biogaz sont produits à l'acidogénèse et seulement 30% pendant les autres phases (JUVENT, 2011). Dans notre dernière expérimentation, le 41,6 % du biogaz produit journalièrement est obtenu lors des quatre premières heures. Ceci est dû probablement à la haute biodégradabilité du substrat liquide (k est grand). Ainsi, si on envisage de faire une fermentation à deux étages, où les phases d'hydrolyse et acidogénèses sont séparés des deux dernières phases, du jus de sisal, il est préférable de mettre un système de récupération du biogaz dans la cuve d'hydrolyse.

3-5-4. Digestion de de 3 L de substrat brut

Cette partie d'expérimentation est à la fois une confirmation du débit maximal du jus supporté par le système de digestion, et un essai de trouver le potentiel de méthanisation de jus de sisal brut. L'augmentation du taux de CO₂ après introduction est due, probablement, à la forte accumulation des acides gras volatils engendrés par la surcharge du substrat. Cette forte teneur en gaz carbonique reste au-dessous de 50% jusqu'au 2^{ème} jour. Même au moment où le pH est déjà égal à 7, il est fort probable que beaucoup de micro-organismes acétogènes et méthanogènes sont tués par l'acidité du substrat et la multiplication des survivants nécessitent plus de temps.

Rappelons que les bactéries acétogènes et méthanogènes ont une vitesse de croissance très lente, donc ils n'arrivent pas à occuper la totalité du milieu qu'au 2^{ème} jour. Le volume total du biogaz obtenu est seulement 28 L. C'est parce que durant les deux nuits successives, le biogaz stocké dans la cloche déborde à cause de la forte vitesse de formation de biogaz. C'est la raison de réalisation de la dernière expérience. Donc en réalité, le biogaz obtenu n'est seulement de 28 L, mais c'est le volume que nous avons pu récupérer malgré l'insuffisance de volume de gazomètre.

3-5-5. Digestion de 1 L de substrat brut

La teneur en méthane est de 50,5 à 52 % en moyenne correspondant aux résultats de MUTHANGYA et al. (2009) qui trouvèrent 50 à 66 % dont le dernier est obtenu par le substrat pré- traité. La courbe cumulé du biogaz obtenu est de la forme $V(t) = A(1 - e^{-kt})$, qui tend vers un maximum à l'infini. Mais en pratique, cet extremum est atteint après une journée.

L'augmentation de volume est forte lors du premier jour, mais diminue progressivement après. En parallèle, lors de 20 premières heures, le teneur en CO₂ est supérieur à 50%. Mais la diminution de pH n'est observée que lors des quatre premières heures, une phase qui est attribuable avec l'acidogénèse. La petite augmentation de température est aperçue à une heure du commencement. C'est l'exécution de la phase d'hydrolyse qui est exothermique. Ainsi, l'hydrolyse s'effectue pendant 1 heure à 1 heure 30 minutes du début. S'ensuit l'acidogénèse qui dure environ deux heures. A partir de la 5^{ème} heure, le taux de CO₂ accumulé doit commencer à diminuer, ce qui n'est pas le cas ici à cause de la forte acidité du substrat. C'est parce que les habitants acétogènes et méthanogènes sont fortement inhibé par cette acidité, et le reste demande plus de temps pour leur croissance.

En combinant le graphe de volume cumulé du biogaz obtenu avec la courbe de disparition de matières volatiles facilement biodégradable, on obtient la figure 16. A

l'instant initial, la concentration de matière volatile dans le substrat introduit est C_0 et à un instant quelconque, elle sera $C(t)$. On note par V_M le volume maximal du biogaz produit par unité de masse des matières volatiles biodégradables et $V(t)$ le volume du biogaz produit par unité de masse de la matière organique.

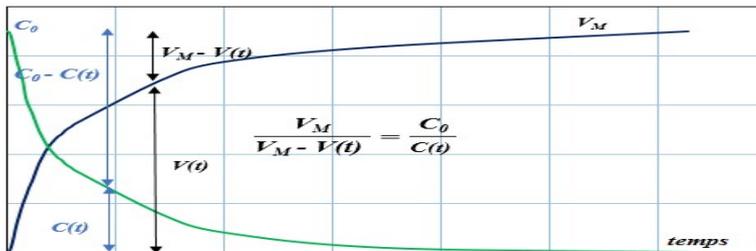


Figure 16: Formation du biogaz et épuisement du substrat dans le temps

On en déduit que la fermentation méthanique est une minéralisation de la matière organique. C'est une dépollution de la matière organique entraînant un assainissement de l'environnement.

On a :

$$\frac{V_M}{V_M - V(t)} = \frac{C_0}{C(t)} \quad (2)$$

La cinétique d'ordre 1 est, de manière générale, la loi la plus utilisée. La loi de vitesse de biodégradation étant proportionnelle à la concentration de matières volatiles biodégradables présentes dans le réacteur, avec un seul réactif limitant, est de la forme:

$$\frac{d}{dt} C(t) = -kC(t), \text{ soit } \frac{C_0}{C(t)} = e^{kt} \text{ avec } k \text{ en } [\text{temps}^{-1}] \quad (3)$$

Le terme k est la mesure du taux de disparition des fractions biodégradables dans le substrat en parallèle avec les augmentations du volume du biogaz produit avec le temps. Si k devient plus grand, le taux d'enlèvement devient le plus rapide. Par contre, si la valeur de k devient plus petite, la disparition de la fraction biodégradable devient le plus lent qui signifie que soit la matière organique est difficilement biodégradable, soit les paramètres de fermentation ne sont pas optimaux. Avec un ordre 1, on simule une décroissance exponentielle de la concentration de matière volatile dégradable du substrat (MAXIME Rouez, 2008), confirmé par la courbe représentée à la figure 15

En combinant (2) avec (3), on a : $\frac{V_M}{V_M - V(t)} = e^{kt}$, soit $V(t) = V_M(1 - e^{-kt})$

La dérivation donne : $\frac{d}{dt} V(t) = V_M k e^{-kt}$ (4). Comme le volume est une grandeur physique positive, on peut passer au logarithme :

$$\ln\left(\frac{d}{dt} V(t)\right) = (\ln V_M + \ln k) - kt, \text{ soit } \frac{1}{t} \ln\left(\frac{d}{dt} V(t)\right) = \frac{1}{t} (\ln V_M + \ln k) - k \quad (5)$$

Il y a donc deux manières de trouver la constante k , soit en traçant $\frac{1}{t} \ln\left(\frac{d}{dt} V(t)\right)$ en fonction de $\frac{1}{t}$ qui sera une droite de la forme $y = ax + b$, dans ce cas, $-k$ sera l'ordonnée à l'origine et $\ln V_M + \ln k$ le coefficient directeur, soit on trace $\frac{d}{dt} V(t)$ puis on cherche sa courbe de tendance permettra d'en déduire k par analogie.

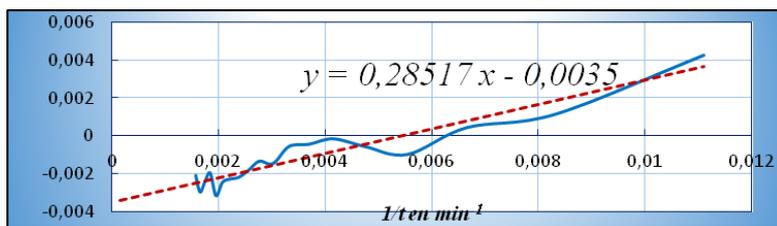


Figure 17 : courbe représentant $\frac{1}{t} \ln\left(\frac{d}{dt} V(t)\right)$ en fonction de $\frac{1}{t}$

On trouve $a = 0,28517$ donnant $V_M = 380 \text{ L/kg}$ et $k = 0,0035 \text{ min}^{-1}$

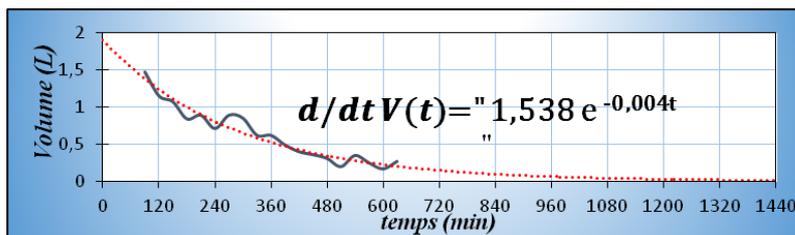


Figure 19 : Courbe de variation de production en volume du biogaz en fonction du temps

Par analogie avec l'équation (4), on obtient $k = 0,004 \text{ min}^{-1}$ et $V_M = 384,5 \text{ L/kg}$. Ces deux valeurs de V_M se rapprochent de celui qui est trouvée expérimentalement, $V_{M \text{ Experimental}} = 388 \text{ L}$ de biogaz par kg de matière volatile. L'hypothèse initial tient debout : la réaction de biométhanisation de ce genre est une réaction biochimique d'ordre 1. Ainsi, l'épuisement du substrat se traduit par :

$$C(t) = C_0 e^{-0,004t}$$

Avec $C_0 = 58 \text{ g L}^{-1}$ soit $0,058 \text{ kg/L}^{-1}$. Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est $\frac{\ln 2}{0,0035} = 198 \text{ minutes}$,

soit d'environ 3 heures et 30 minutes pendant lequel la moitié des matières volatiles biodégradables introduites est digérée. Ceci se rapproche de ce que montre la figure 19 : une forte production en biogaz est observée entre la 1^{ère} et la 3^{ème} heure de fermentation, et le 41,6 % du biogaz produit journalièrement est obtenu lors des 04 premières heures. Ce qui confirme l'hypothèse de JUVENT P. Magoggo (2011) disant

qu'une grande quantité de biogaz est produite lors de la phase acidogénèse. Après 24 h de digestion, soit 1440 minutes, il ne reste que 0,18 g de matière organique dans le 1L de substrat introduit. Donc on a un court temps de rétention dû à la grande valeur de k (0,0035 min⁻¹ soit 0,21 h⁻¹ et 5,04 j⁻¹).

Ces valeurs de k sont grandes par rapport à celles qui sont trouvées par YUSUFU *et al.* (2015), lorsqu'ils ont amélioré la performance de biodégradation des déchets solides de sisal par réduction de dimension dont les valeurs trouvées sont 0,4 et 0,5 j⁻¹. Ce qui s'explique par la facilité de dégradation du substrat liquide par rapport au substrat solide. Le court temps de rétention s'explique aussi par la haute performance du biodigester conçu qui est capable de digérer jusqu'à 58 g des matières volatiles soit 1 L de substrat brut par jour.

3-7. Equivalence énergétique des déchets liquides de sisal à Amboasary Sud

La production volumique est de 22,5 litres de biogaz par litre de jus de sisal, soit une production massique de 321,43 l/ kg de matière sèche, un résultat qui a révélé que les 112 948,3 m³/ an de jus de sisal de Mandrare ont une possibilité d'en produire 2 541 336 m³ biogaz par an. En effectuant une fermentation méthanique des substrats liquides avec 10 % de rumen, la quantité de biogaz isolable, annuellement, est de 19,8 GWh, pouvant substituer 5 337 tonnes de bois de chauffage, soient 2 643 tonnes de charbon de bois, 2 064 m³ de gasoil et 2 140 mètres cubed'essence.

Dans le cas de la fermentation du substrat à l'état brut du substrat sans co-digestion, on obtient une puissance de 13,16 GWh.an⁻¹, équivalent à 3 532,5 tonnes de bois de chauffe, soient 1 771 tonnes de charbon de bois, 1 372 m³ de gasoil et 1 423 m³ d'essence.

Comme le central thermique JIRAMA d'Amboasary produit 877 à 1100 kWh par jour, soit 0,4015 GWh / an. Cette consommation annuelle ne constitue que 2 % de l'énergie isolable à partir de la fermentation des déchets liquides par an (19,8 GWh). Cette recherche a démontré ainsi d'une manière satisfaisante qu'on peut produire assez de biogaz de qualité suffisante pour les buts domestiques, tel que cuire et chauffer et pour exécuter une génération d'électricité. La technique de biométhanisation de jus de sisal sera appréciée dans la région d'Amboasary Sud, une ville qui subit 12 heures de délestage par jour, et dont le bois de chauffage est aussi un problème. Elle présente des considérations aussi bien socio-économiques qu'écologiques.

La valorisation de biogaz favorise la création des activités génératrices d'emplois. Sa promotion permet l'indépendance énergétique entraînant une amélioration des niveaux de vies des producteurs consommateurs. Elle saura aussi une résolution des problèmes de bois de chauffes et des braises dont la collecte est une tâche épuisante, devenue un casse-tête.

La vulgarisation du biogaz permet le développement de l'économie financière, de l'économie de pétrole et de l'économie des forêts. Epargnes, gain de temps et propreté résultent aussi de cette activité. Elle évite la surcharge d'endettement, et la vulnérabilité économique croissante associée aux importations des pétroles et ses dérivés. En effet, l'exploitation des mines des déchets liquides de sisal à Amboasary Sud économisera 0,3 % des devises d'importations de pétrole annuelles de Madagascar, soit une somme de 7 224 milliard d'Ariary par an en prenant 35 000 Ariary le prix de litre de gasoil.

L'utilisation du biogaz comme combustible contribue à la réduction de l'utilisation excessive de bois de chauffage et de charbon de bois qui sont les principaux facteurs de la déforestation. Ce qui sauvegardera les forêts, qui sont de puits de carbone. Par exemple, une économie de 100 kg de charbon de bois sauvera 2,18 m³ de prélèvement en forêt (RAMAMPIHERIKA, 2012). Ainsi, elles continuent la séquestration de CO₂ atmosphérique par photosynthèse. Le remplacement de l'utilisation des sources d'énergie riches en carbone par le méthane contribue à réduire l'émission de CO₂ dans l'atmosphère.

Conclusion

L'objectif de ce travail était d'optimiser les paramètres de biométhanisation du jus de sisal, afin de pouvoir contrôler la biodégradation de ces déchets organiques. Après avoir recueilli les informations concernant les déchets au travers des sociétés sisalières à Amboasary Sud, la quantité des déchets liquides issus des industries de sisal est de l'ordre de 700 000 m³/ an dont 600 000 m³ d'eau et 112 948 m³ de jus de sisal brute, qui sont déversés dans la nature causant une grave pollution. Deux expérimentations démontrent l'obtention des deux types de biogaz : à partir d'une fermentation en anaérobiose de jus de sisal brut et fermentation de jus traité avec 10 % de rumen. Seulement moins d'une minute après le chargement des digesteurs, du biogaz s'est formé. L'étude et le suivi de près et régulier de la production en biogaz a permis de déterminer la productivité en biogaz de ce substrat, environ 22,5 litres a été récolté pendant une durée de fermentation de 2 jours d'un litre de substrat. Le rendement moyen est de 388 L de biogaz / kg de matière organique, un gaz à 79 % en méthane dans le cas d'une digestion du jus ajouté de 10 % de rumen, et 52 % pour le jus brut. Les études techniques d'anticipation des résultats futurs dans ce sens prévoient d'ailleurs des productions annuelles en biogaz de 2 541 336 m³.

Sur le plan social, la transformation des déchets de sisal en biogaz sera une activité génératrice d'emplois. Elle favorisera l'indépendance énergétique, et aura des impacts sanitaires positifs, une résolution des problèmes de bois de chauffe entraînant une amélioration de niveau de vie. Enfin, ce travail est un document pouvant servir de base

aux discussions politiques dans le domaine des énergies renouvelables, à la prise de décisions au sein des acteurs y prenant part, mais aussi un document informatif sur la faisabilité de tels projets. En conclusion, notre génération est l'acteur essentiel dans les changements de demain. Certes, il y a déjà eu des crises, mais évitons la plus grave à venir.

Remerciements

Nous exprimons nos remerciements et notre gratitude au Cellule Régionale des Energies Alternatives pour le Développement et Environnement (CREADE), au Laboratoire de Chimie des Substances Naturelles (LCSN) et à Monsieur RAMAMPIHERIKA Kotonirina Daniel, Directeur du CREADE pour leur soutien et leur constante disponibilité.

Bibliographie

DELFOSSÉ P. (2011). Microbiologie de la digestion anaérobie, Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann.

MAXIME Rouez. (2008) Dégradation anaérobie de déchets solides : caractérisation, facteurs d'influence et modélisations Thèse de doctorat en Sciences de l'Environnement Industriel et Urbain, École doctorale de Chimie de Lyon, 239p

MEYNELL P.J. (1976) Methane, planing a digester. 163p. Ed. Prism Press in RAMAMPIHERIKA. Fermentation méthanique appliquée à la valorisation de la biomasse algo-océanique du Sud-ouest de Madagascar, pp. 08.

MORELLI, A. and RINDOME B. (1990) Fatty acids monitoring in the anaerobic depuration of olive oil mill wastewater. *Biological Wastes*, 32, 253- 263.

MORGAN, J.W., EVISON, L.M., FORSTER, C.F. (1991) Change to microbial ecology in anaerobic digestion treating ice cream wastewater during start-up. *Water Research*, vol.25, n°6: pp. 639-653 in RAKOTONIAINA Volana Astérie 2012: Co-méthanisation des déchets fermiers et alimentaires: expérimentation et modélisation. Thèse, Mécanique et Environnement, Université de La Réunion, pp. 09.

MUSA I. TANIMU, TINIA I. MOHD Ghazi, RAZIF M. Harun, and AZNI Idris (2014) Effect of Carbon to Nitrogen Ratio of Food Waste on Biogas Methane Production in a Batch mesophilic Anaerobic Digester. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, April 2014, Vol. 5, no.2, p 116-119.

Kinetics of anaerobic treatment: a critical review, *Critical Reviews in Environmental Control*, vol. 21, pp. 411-490.

- RAMAMPIHERIKA K. D. (1997) Biométhanisation appliquée à la valorisation agro-énergétique et chimique des déchets : développement lié à la protection de l'environnement côtier et marin. Thèse de docteur de troisième cycle en biotechnologie marine, Université de Toliara, 99p et Annexes.
- RAMAMPIHERIKA K.D (2012) Actions et recherches pour lutter contre le changement climatique et l'épuisement des ressources conventionnelles dans le Sud-ouest de Madagascar.
- SKILLMAN L. C., EVANS P. N., NAYLOR G. E., MORVAN B., JARVIS G. N., JOBLINK.N. (2004) 16S ribosomal DNA-directed PCR primers for ruminal methanogens and identification of methanogens colonising young lambs. *Anaerobe*, vol. 10, 277-285 in Guillaume Hervé BELBIS2007 : Flore du rumen : origine, composition, évolution, conséquences physiopathologiques, Thèse pour le doctorat vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, 140 p, p. 65
- STEWART C. S., BRYANT M. (1988) The rumen bacteria. In: Hobson PN, editors. The rumen microbial ecosystem. Elsevier Science Publisher, New York, 21-75. 527 p in Guillaume Hervé BELBIS 2007 : Flore du rumen : origine, composition, évolution, conséquences physiopathologiques, Thèse pour le doctorat vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, 140 p., p. 45, 46, 47
- Stratégie Nationale pour le développement de l'utilisation de l'engrais (2006) Capacité de production d'engrais, ANNEXE A3-1, pp. 20.
- WHEATLEY A. (1990) Anaerobic digestion: A waste water treatment technology, Elsevier Applied Science in RAKOTONIAINA Volana Astérie 2012: Co-méthanisation des déchets fermiers et alimentaires : expérimentation et modélisation, Thèse, Mécanique et Environnement, Université de La Réunion, pp. 06.
- YADVIKA S., SREEKRISHNAN T. R., SANGEETA K., VINEET R. (2004) Enhancement of biogas production from solid substrates using different technique - A Review. *Bioresource Technolgy*, vol. 95, pp. 1-10 in Joaneson LACOUR, Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti, Thèse, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), 2012, pp. 58.

- YANAGITA K., KAMAGATA Y., KAWAHARASAKI M., SUZUKI T., NAKAMURA Y., MINATO H. (2000) Phylogenetic analysis of methanogens in sheep rumen ecosystem and detection of *Methanomicrobium mobile* by Fluorescence in Situ Hybridization. *Biosc. Biotechnol. Biochem.*, vol. 64, 1737-1742 in Guillaume Hervé BELBIS 2007 : Flore du rumen : origine, composition, évolution, conséquences physiopathologiques, Thèse pour le doctorat vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, 140 p., pp. 45, 46,47.
- YU H., SAMANI Z., HANSON A., SMITH G. (2000) Energy recovery from grass using two-phase anaerobic digestion. *Waste Manage.*22:1-5.
- Association ADILCA Les lois physiques des automobiles, Rapport, disponible sur www.adilca.com, consulté le 06 juin 2017.
- BEAUDET M. (2003) Les biogaz et les sites d'enfouissement in M. DUPONT Nicolas 2010 : Valorisation du biogaz de fermentation : combustion catalytique. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon I, 220 p., disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-0081686>, consulté le 05 juin 2017, pp. 13
- DUPONT Nicolas (2010) Valorisation du biogaz de fermentation : combustion catalytique. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon I, 220 p., disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-0081686>, consulté le 05 juin 2017
- JOUANY, J. P. (1994) Les fermentations dans le rumen et leur optimisation. *INRA Productions Animales* vol.7, n°3, pp. 207-225, disponible sur <hal-00896087>, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00896087>, consulté le 11 Août 2017.
- JUVENT P. M. (2011) Cleaner integral utilization of sisal waste for biogas and biofertilizers, Project completion report UNIDO: FC/URT/04/118, US/URT/02/117, SF/URT/05/11, 34p., <http://www.unido.org>, consulté le 30 Avril 2017
- LACOUR Joaneson (2012) Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti, Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (France), 121p., disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00825479>, consulté le 05 mai 2017, pp. 49.

- LOCK G. W. (1969) Sisal. Longmans Green, 2nd edition. pp. 365-460. In MUTHANGYA M., HASHIM S. O., AMANA M., MSHANDETE A. M. and KIVAISI A. K. (2013): Auditing and characterisation of sisal processing waste: a bioresource for value addition", ARPN Journal of Agricultural and Biological Science (vol. 8, n° 7, July 2013), p. 518- 524, disponible sur www.arpnjournals.com, consulté le 05 Août 2017.
- MIGNON C. (2009) Biométhanisation : Utilisation du digestat comme fertilisant en Agriculture. Valbiom : Valorisation de la biomasse asbl., disponible sur https://www.valbiom.be/utilisation_du_digestat/1284120093.pdf, consulté le 09 Juillet 2017
- MOLETTA (2002) La méthanisation de la matière organique, Aspects généraux, 12p., pp. 6- 7. Disponible sur <http://rene.moletta.perso.sfr.fr/>, consulté le 13 Août 2017.
- MUTHANGYA M., HASHIM S. O., AMANA M., MSHANDETE A. M. and KIVAISI A. K. (2013) Auditing and characterisation of sisal processing waste: a bioresource for value addition", ARPN Journal of Agricultural and Biological Science (vol. 8, n° 7, July 2013), p. 518- 524, disponible sur www.arpnjournals.com, consulté le 05 Août 2017
- MUTHANGYA M., MSHANDETE A. M. and KIVAISI A. K. (2009) Enhancement of anaerobic digestion of sisal leaf decortication residues by biological pre-treatment", ARPN Journal of Agricultural and Biological Science, vol. 4,n° 4, July 2009, www.arpnjournals.com, consulté le 06 Août 2017