



**CARACTERISATION DU BIOGAZ PRODUIT A PARTIR DES SUBSTRATS
BOVINS ET PORCINS DANS LA REGION DU CENTRE DU BURKINA FASO.**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER D'INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : EAU ET ASSAINISSEMENT

Présenté et soutenu publiquement par

Facia Giraude Filde ADEOSSI

Travaux dirigés par :

Dr Yacouba KONATE

Enseignant-Chercheur/ CENTRE COMMUN DE RECHERCHE EAU-CLIMAT

Et

Ing Hamidou SAMA

*Conseiller en Energies Renouvelables SNV / PROGRAMME NATIONAL DES
BIODIGESTEURS BURKINA FASO*

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Anderson ANDRIANISA**

Membres et correcteurs : **Salimata SPINATO**
Yacouba KONATE
Hamidou SAMA

Promotion

[2012/2013]

CITATION

« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ».

LAVOISIER

.

DÉDICACE

*A mon père **Bienvenu ADEOSSI** et ma mère **Léonie KUASSI**, pour avoir toujours cru en moi.*

REMERCIEMENTS

Les travaux exposés dans ce document sont les résultats d'un stage effectué au Programme National des Biodigesteurs du Burkina Faso (PNB-BF) en collaboration avec la Fondation 2iE en tant que partenaire scientifique. Je tiens à travers ces lignes à exprimer ma reconnaissance aux responsables et toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de cette étude.

Mes remerciements s'adressent au prime abord à Dr Yacouba KONATE pour m'avoir encadré et suivi et qui avec Mr Achille SANOU n'ont ménagé aucun effort pour que ce stage soit effectif.

Je remercie également Mr Xavier BAMBARA Coordonnateur du PNB-BF pour m'avoir accepté comme stagiaire au sein du programme.

Le suivi des travaux au sein du PNB-BF n'aurait pu être possible sans la disponibilité de Mr Achille SAMA Conseiller SNV auprès du PNB envers qui j'exprime toute ma gratitude.

Je n'oublie pas de remercier l'équipe du PNB-BF pour leur disponibilité et particulièrement Mlle Julienne ZAMPALIGRE Superviseur, Mlle Gwladys SANDWIDI, Mr Adama SANDWIDI, Mr Issa TRAORE Responsable Administratif et Financier, Mme Albertine SOME Assistante Administrative, Mme Sylvie YAMEOGO chargée de Communication et Marketing, Mlle Nadège NAON Stagiaire comptable.

Les travaux de laboratoire à la Fondation 2iE ont été facilités par l'assistance de Dr Yohann RICHARDSON, Mr Boukary SAWADOGO Responsable du laboratoire Eau Potable, Mr Seyram SOSSOU Responsable du laboratoire Microbiologie, Mr Moustapha OUEDRAOGO Exploitant de la station d'épuration.

Mes salutations vont à l'endroit des collègues de la même promotion et avec qui j'ai collaboré au laboratoire : Abraham SEDEGO, Parfait GBEDENU, Christophe TOLGOURO, Firmin SOME, Zalissa KARGOUGOU, Valérie ZONGO, Ismael KABORE, Emerique ZEBE, Ali AHMED, Caleb N'DJANTENG.

Je remercie mes amis Bairiot VIGAN, Darius OUINSOU, Arnaud QUENUM, Woura TIJANI SERPOS, Belfrid DJIHOUESSI, Marius SINDAGBO.

J'ai une pensée particulière vers mes frères et sœurs Brunelle ADEOSSI, Merlène ADEOSSI, Ronald ADEOSSI, Jerry AHOSSIN-GHEZO, Juliana AHOSSIN-GHEZO et Johanelle AHOSSIN-GHEZO.

Merci également à Mlle Sonia PODA pour son soutien en tout temps.

RESUME

L'accès à l'énergie est un enjeu majeur de notre temps. Au Burkina Faso, le coût des énergies fossiles et la difficulté de desservir les régions enclavées ont engendré une consommation accrue du bois et une forte dégradation des forêts.

A l'heure où les énergies renouvelables sont de plus en plus évoquées pour compléter ou substituer progressivement aux énergies fossiles, la méthanisation est une opportunité de diversification des ressources énergétiques et de gestion durable de l'environnement dans les zones rurales.

La caractérisation du biogaz au niveau de quatre digesteurs installés par le Programme National des Biodigesteurs du Burkina Faso (PNB-BF) et fonctionnant avec des substrats porcins et bovins a montré que 33,4 % à 40 % de la DCO et 10,5 % à 16,7 % des MVS sont dégradées.

La composition du biogaz est de 54,5 % de CH₄ et 36 % de CO₂ pour les substrats porcins et 48,41% de CH₄ et 39,6 % de CO₂ pour les substrats bovins. Le volume moyen de biogaz produit varie de, 0,551 m³/jour à 1,606 m³/jour en fonction des sites de biodigesteurs étudiés. Ces compositions et volumes dépendent des conditions de digestions.

Sur le plan sanitaire l'abattement des coliformes fécaux varie de 2,04 Ulog à 2,74 Ulog et celui des streptocoques fécaux de 1,5 Ulog et 3,4 Ulog.

Par ailleurs les digestats présentent une valeur fertilisante intéressante (611 mg/l à 1112 mg/l de NH₄⁺; 267 mg/l à 506,67 mg/l de PT; 422,67 mg/l à 932 mg/l de PO₄³⁻ et 0,81 mg/g à 1,4 mg/g K⁺) qu'il conviendrait d'évaluer à travers d'autres études.

Mots Clés :

- 1 – Biodigesteur
- 2 – Méthanisation
- 3 – Biogaz
- 4 – Digestats
- 5 – Burkina Faso

ABSTRACT

Access to energy is a major challenge of our generation. In Burkina Faso, the cost of fossil fuels and the difficulty of serving remote areas led to an increased consumption of wood and heavy forest degradation.

By the moment when renewable energies are increasingly raised to complete or gradually replace fossil energy, anaerobic digestion is an opportunity to diversify energy resources and sustainable management of the environment in rural areas.

The characterization of biogas from four digesters installed by the PNB-BF and working with cattle and pigs substrates showed that 33,4 % to 40 % of the COD and 10,5 % à 16,7 % of VSS are degraded.

The composition of biogas is 54,5 % of CH₄ and 36 % of CO₂ for pig's substrates and 48,41 % of CH₄ and 39,6 % of CO₂ for cattle substrates. The average volumes of biogas vary from 0,551 m³/day to 1,606 m³/day following the biodigesters sites studied.

. These compositions and volumes depend on the conditions of digestion.

On the health front, the coliforms abatement is 2,04 to 2,74 Ulog and the streptocoques abatement is 1,5 and 3,4 Ulog.

Moreover digestate present an interesting fertilizer value (610.67 mg/l to 1112 mg/l of NH₄⁺; 266.67 mg/l to 506.67 mg/l PT; 422.67 mg/l to 932 mg / l of PO₄³⁻ and 0.806 mg/g to 1.370 mg/g K⁺) that should be evaluated through other studies.

Key words :

- 1 - Biodigester
- 2 – Anaerobic digestion
- 3 - Biogas
- 4 - Digestate
- 5 – Burkina Faso

LISTE DES SIGLES ABRÉVIATIONS

ABPP : African Biogas Partnership Programme

ATEE : Association Technique Energie Environnement

DBO : Demande Biochimique en Oxygène

CET : Centre d'Enfouissement Technique

DCO : Demande Chimique en Oxygène

DGIS : Ministère Néerlandais des Affaires Etrangères Hollandais

F CFA : Franc de la Communauté Financière Africaine.

GTZ: Deutsche Gesellschaft für Technishe Zusammenarbeit

HIVOS: Humanist Institute for Co-operation with Developing Countries

INSD : Institut National de la Statistique et de la Démographie.

IRSAT : Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies

LBEB : Laboratoire Biomasse Energie Biocarburant

LEDES : Laboratoire Eau Dépollution Ecosystème et Santé

MAP: Ministère de l'Agriculture et des Pèches

MRA : Ministère des Ressources Animales

MS : Matières Sèches

MVS: Matières Volatiles Sèches

OHPA : Obligate Hydrogen Producing Bacteria

pH: Potentiel d'Hydrogène

PIB : Produit Intérieur Brut

PNB-BF : Programme National des Biodigesteurs du Burkina Faso

R&D : Recherche et développement

S&E : Suivi et Etudes

STEP : STation d'Euration

SNV : Organisation Néerlandaise de Développement

Ulog: Unité logarythmique

2iE : Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

TABLE DES MATIERES

<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
CITATION	<i>i</i>
DÉDICACE	<i>ii</i>
REMERCIEMENTS	<i>iii</i>
ABSTRACT	<i>v</i>
LISTE DES SIGLES ABRÉVIATIONS	<i>vi</i>
LISTE DES TABLEAUX	<i>x</i>
LISTE DES FIGURES	<i>xi</i>
I. INTRODUCTION	<i>1</i>
I.1. Hypothèses	<i>3</i>
I.2. Objectifs	<i>3</i>
II. CADRE D'ETUDE	<i>4</i>
II.1. Présentation du Programme National des Biodigesteurs.....	<i>4</i>
II.2.1. Situation géographique	<i>6</i>
II.2.2. Climat	<i>6</i>
II.2.3. Hydrographie	<i>7</i>
II.3.4. Aspects démographiques	<i>7</i>
III. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	<i>8</i>
III.1. Définition de la méthanisation	<i>8</i>
III.2. Etapes de la méthanisation	<i>8</i>
III.3. Paramètres physico-chimiques de la méthanisation	<i>10</i>
III.4. Principaux inhibiteurs de la méthanisation	<i>12</i>
III.5. Pertinence du choix de la méthanisation	<i>13</i>
III.5.1. Principales utilisations du biogaz domestique	<i>13</i>
III.6. Différents types de biodigesteurs	<i>13</i>
III.6.1. Présentation du prototype de biodigester du PNB-BF	<i>15</i>

III.6.2. Caractéristiques du lisier de porc et de la bouse de vache	16
III.7. Produits de la méthanisation	17
III.7.1. Le biogaz	17
III.7.2. Le digestat	18
IV. MATERIEL ET METHODES.....	19
IV.1. Matériel d'analyse.....	19
IV.2. Méthodes d'analyse.....	19
IV.2.1. Caractérisation des substrats	20
IV.2.2. Caractérisation du biogaz.....	21
V. RESULTATS	23
V.1. Caractéristiques physico-chimiques des substrats d'alimentation	23
V.2. Composition du biogaz par type de substrat	24
V.3. Estimation de la production de biogaz	25
V.4. Evaluation de la qualité des digestats	27
V.4.1. Microbiologie	27
V.4.2. Valeur agronomique	28
VI. Discussion.....	29
VII. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	32
ANNEXES	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Potentiel technique de six (6) régions du Burkina Faso.....	5
Tableau 2: Ratio de substitution.....	13
Tableau 3: Caractéristiques des substrats selon différents auteurs	17
Tableau 4: Composition des biogaz de différentes sources	18
Tableau 5: Condition d'analyse des biogaz par micro-GC.....	21
Tableau 6: Caractéristiques physico-chimique des substrats	23
Tableau 7: Composition du biogaz par site d'échantillonnage.....	24
Tableau 8: Microbiologie des substrats.....	27
Tableau 9: Valeurs fertilisantes des substrats	28
Tableau 10: Potentiel de production de biogaz à partir des matières brutes	37
Tableau 11: valeurs moyennes et extrêmes des paramètres physico-chimiques.....	37
Tableau 12: Production de biogaz en fonction des MVS.....	39
Tableau 13: Synthèse de la caractérisation du biogaz.....	39
Tableau 14: Composition moyenne des biogaz par site.....	41
Tableau 15: Données brutes sur la valeur agronomique	42
Tableau 16: Microbiologie de la méthanisation.....	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Principales fonctions du PNB-BF.....	5
Figure 2: Carte de situation de la zone d'étude.....	6
Figure 3: Etapes de la méthanisation.....	8
Figure 4 (a,b,c,d,e et f): Principe de fonctionnement de quelques digesteurs (Scriban, 1985)15	15
Figure 5: Vue en plan et coupe A-A du biodigesteur (PNB-BF,2009).....	15
Figure 6: Digesteur en construction (SNV, 2012) Figure 7: Digesteur en exploitation (Cliché Adéossi).....	16
Figure 8: Mesure de paramètre in situ Figure 9: Mise d'échantillons à l'étuve.....	21
Figure 10: Prélèvement du biogaz Figure 11: Analyse du biogaz au Micro GC ...	22
Figure 12: Composition moyenne du biogaz des substrats porcins	24
Figure 13: Composition moyenne du bigaz des substrats bovins	25
Figure 14: Production de biogaz sur le site de Possontenga	25
Figure 15: Production de biogaz sur le site de Bassemyam II	26
Figure 16: Production de biogaaz sur le site de Bassemyam I.....	26
Figure 17: Production de biogaz sur le site de Nioko II.....	26
Figure 18: Boîtes de pétriensemencées	43
Figure 19: Digestat en sortie du digesteur Figure 20: Digestat déshydraté et desséché ..	44
Figure 21: Digestat en compostage Figure 22: Digestat prêt pour l'amendement	44

I. INTRODUCTION

Le développement socio-économique qui s'est produit aux XIX^{ème} et XX^{ème} siècles aurait été impossible sans énergie. En effet, le charbon, le pétrole, le gaz naturel et divers autres sources d'énergie ont été le moteur de l'économie mondiale. Actuellement, l'énergie est disponible en grande quantité, et reste relativement bon marché. Elle permet à de nombreuses populations de bénéficier de très hauts niveaux de confort, de productivité et de mobilité. L'accès à ces grandes quantités d'énergie et leur exploitation est cependant inégalement réparti entre les régions et les pays.

Ainsi, l'accès à l'énergie est un enjeu majeur de l'Etat du BURKINA FASO. En 2006, 198,5 milliards de FCFA soit 7% du PIB ont été consacrés à l'importation des produits pétroliers ; ce qui correspond presque à la valeur des exportations de coton et qui ne représente que le 20^{ème} de la consommation totale en énergie. Quant aux énergies traditionnelles et notamment celles de la biomasse (bois, charbons de bois, résidus agricoles), elles représentent 86% de la consommation énergétique ; ce qui entraîne une perte annuelle de 4% du couvert forestier national (MAP, 2009). L'utilisation de la biomasse entraîne également une fragilisation de l'état sanitaire des femmes et des enfants par : les maladies respiratoires et oculaires dues à la fumée (combustion incomplète du bois ou du charbon de bois) et les dures corvées liées à la recherche du bois de chauffe. Toutes choses qui les empêchent de mieux se consacrer aux activités génératrices de revenus et aux études. (PNB-BF, 2009).

Face à cette situation, l'utilisation des énergies renouvelables paraît plus intéressante, tant pour diminuer les pressions sur les ressources forestières que les montants investis pour les énergies fossiles. Parmi les sources d'énergies renouvelables, la méthanisation recèle un potentiel important par sa double capacité de valorisation énergétique des déchets organiques et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (ATEE, 2011). Elle pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique à ces problèmes à travers une autonomie énergétique et un développement agricole durable des zones rurales (Tou et al, 2001).

En effet, avec les avancements technologiques dans ce domaine comme la multiplication des applications de valorisation, la production du biogaz devient adaptable avec tous les types de débouchés possibles à proximité ou à distance pour des usages internes ou externes. Il ne faut pas oublier d'autres avantages comme les coproduits qui accompagnent la

production du biogaz. Les digestats peuvent être valorisés comme engrais sur les sols agricoles avec une bonne valeur fertilisante. La totalité de l'azote contenu dans la matière méthanisée est conservée lors de la méthanisation. En revanche, il y a une modification de la forme organique d'origine en une forme ammoniacale NH_4^+ plus assimilable par les plantes. Le digestat a aussi une valeur structurante pour le sol puisque la matière organique qui formera l'humus est partiellement conservée. (Almansour, 2011). Bien que l'épandage des effluents d'élevage sur les terres agricoles soit pratiqué depuis très longtemps, le digestat issu de la méthanisation de déchets organiques agricoles est encore mal connu d'un point de vue microbiologique, même si le traitement par digestion anaérobie permet de produire à la fois un amendement organique et un fertilisant de bonne valeur agronomique. Mais ses teneurs en micropolluants et pathogènes sont regardées avec suspicion principalement lorsque sont traitées des boues de station d'épuration urbaine.

En outre, la capture du biogaz et sa réutilisation pourrait accroître la faisabilité économique des projets d'assainissement à travers la production d'électricité et la vente de crédits carbone (Konaté et al 2013).

Fort de ses expériences dans le domaine, le Ministère Néerlandais des Affaires Etrangères (DGIS) a décidé d'appuyer financièrement des pays africains dans la promotion et la vulgarisation de la technologie du biodigester. Cette tâche a été confiée à l'African Biogas Partnership Programme (ABPP), fruit d'un partenariat Public/Privé entre DGIS et deux (02) organisations (HIVOS et SNV) de la société civile néerlandaise. Le Programme National des Biodigesteurs (PNB-BF) est le fruit de cette coopération au BURKINA FASO. Il vise grâce à la construction de 10 000 biodigesteurs dans les zones d'intervention du programme à améliorer les conditions d'existence des populations rurales à travers l'exploitation des bénéfices marchands et non marchands du biogaz domestique.

Dans le cadre de ses activités de recherche développement, le PNB-BF a prévu suivre et évaluer les indicateurs de performance des installations des biodigesteurs installés. Ces activités seront indispensables à l'amélioration et à la mise à jour du programme ainsi qu'à son adaptation aux exigences de la demande. C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude intitulée : « CARACTERISATION DU BIOGAZ PRODUIT A PARTIR DES SUBSTRATS BOVINS ET PORCINS DANS LA REGION DU CENTRE DU BURKINA FASO » qui s'articule autour de trois parties que sont :

- La présentation du cadre et de la zone d'étude ;
- La revue bibliographique et la méthodologie

- Les résultats et leur discussion à la lumière de quelques études précédentes.

I.1. Hypothèses

- 1) La composition du biogaz varie en fonction du substrat, du chargement et du mode d'exploitation des biodigesteurs;
- 2) la production de biogaz au niveau des digesteurs installés est optimale dans les conditions climatiques chaudes du sahel ; ceci à cause de la minéralisation suffisante de la matière organique ;
- 3) les digestats obtenus auraient une valeur agronomique intéressante pour être utilisés pour l'amendement des sols mais présenteraient des risques sanitaires pour l'homme quant à leur manipulation.

I.2. Objectifs

Le présent travail a pour objectif général d'évaluer la performance des biodigesteurs installés par le PNB-BF dans la Région du centre et en général au Burkina Faso et qui fonctionnent avec des substrats de déjections de porcs et de vaches. Il contribuera spécifiquement :

- à la caractérisation des substrats bovins et porcins utilisés pour la production du biogaz ;
- au diagnostic du système de production de biogaz ;
- à la caractérisation du biogaz dans le temps et selon le substrat ;

II. CADRE D'ETUDE

II.1. Présentation du Programme National des Biodigesteurs

Le PNB-BF est un programme conduit par le **Ministère des Ressources Animales** dans un processus multi-acteurs et multisectoriels. Il a pour objectif global la création d'un secteur permanent (viable, orienté vers le marché) et multi acteurs de construction de biodigesteurs afin d'améliorer les conditions de vie, d'accroître de manière durable les productions agro-pastorales et de lutter contre la pauvreté des ménages. Sa formulation a suivi plusieurs étapes dont les principales sont rappelées ci-dessous.

En début 2007, la SNV Burkina est informée de l'existence d'une initiative africaine pour la promotion du biogaz domestique dénommée «*Biogaz pour une vie meilleure: une initiative africaine* ». Forte de son expérience dans le domaine en Asie, la SNV (Organisation Néerlandaise de Développement) décide en collaboration avec la GTZ (**Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit**) de conduire en juin 2007 une étude de faisabilité qui conclut à l'existence d'un potentiel technique compris entre 500 000 et 1000 000 de biodigesteurs.

L'Etude de faisabilité rapporte que toutes les régions disposent de ce potentiel. Mais celles de l'Est, des Cascades, des Hauts-Bassins, du Sud-ouest et la Zone périurbaine de Ouagadougou et de Bobo-Dioulasso ont le potentiel le plus important. Ces régions ont été choisies parce qu'elles disposent, comparativement aux autres, de potentiels technique, économique et financier plus importants. Les caractéristiques qui sont révélatrices de ces potentiels sont:

- la forte concentration d'agropasteurs qui pratiquent la stabulation totale ou la semi stabulation des animaux ;
- la bonne disponibilité en eau ;
- la présence d'un couvert végétal relativement important qu'il faut préserver contre la coupe du bois de chauffe et la production de charbon ;
- l'existence d'élevages intensifs et semi-intensifs dans la zone périurbaine de Ouagadougou pour la vulgarisation de la technologie du biogaz ;
- l'existence d'institutions de micro crédit ;
- l'existence de maçons et de petites entreprises de construction de bâtiments susceptibles d'être intéressés par l'activité de construction de biodigesteurs.

A partir des effectifs du cheptel et des systèmes d'élevage en présence, le potentiel dans les régions suscitées a été estimé à 110 000 ménages éligibles repartis conformément au tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1: Potentiel technique de six (6) régions du Burkina Faso

Régions	Nombre de ménages	Clients potentiels
Zones périurbaines	40 000	20 000
Hauts-Bassins	134 844	26 968
Est	110 526	22 105
Sahel	91 074	18 124
Sud-ouest	62 405	13 481
Cascades	52 496	10 499
Total		110 267

Source: GTZ (2007).

Au regard de ces résultats, la formulation et la mise en œuvre d'un Programme National pour favoriser l'utilisation du biogaz à usage domestique et l'émergence d'un secteur marchand viable de biogaz a été recommandée par l'étude de faisabilité. C'est alors que SNV-Burkina entreprend d'intéresser l'Etat burkinabé. Les principales fonctions et la stratégie de mise en œuvre du PNB-BF sont illustrées par la figure 1.

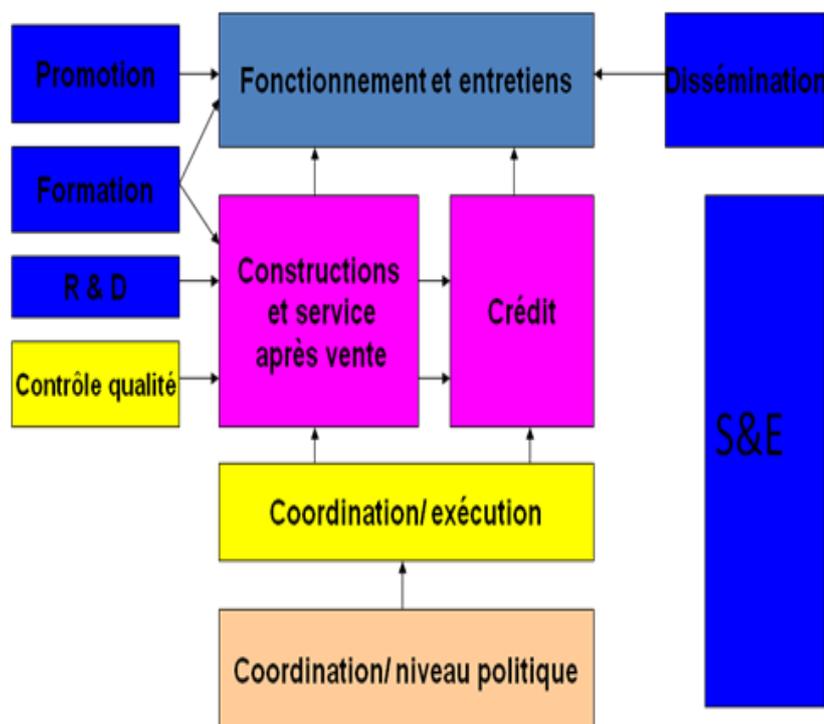


Figure 1: Principales fonctions du PNB-BF (PN-BF, 2009)

II.2. Présentation de la zone d'étude

II.2.1. Situation géographique

La zone couverte par notre étude est la commune de Komsilga et celle de Ouagadougou situées dans la province de Kadiogo (Figure 2). Les localités où sont implantés les ouvrages objets de notre étude sont Ponsontenga , Bassemya et Nioko II.

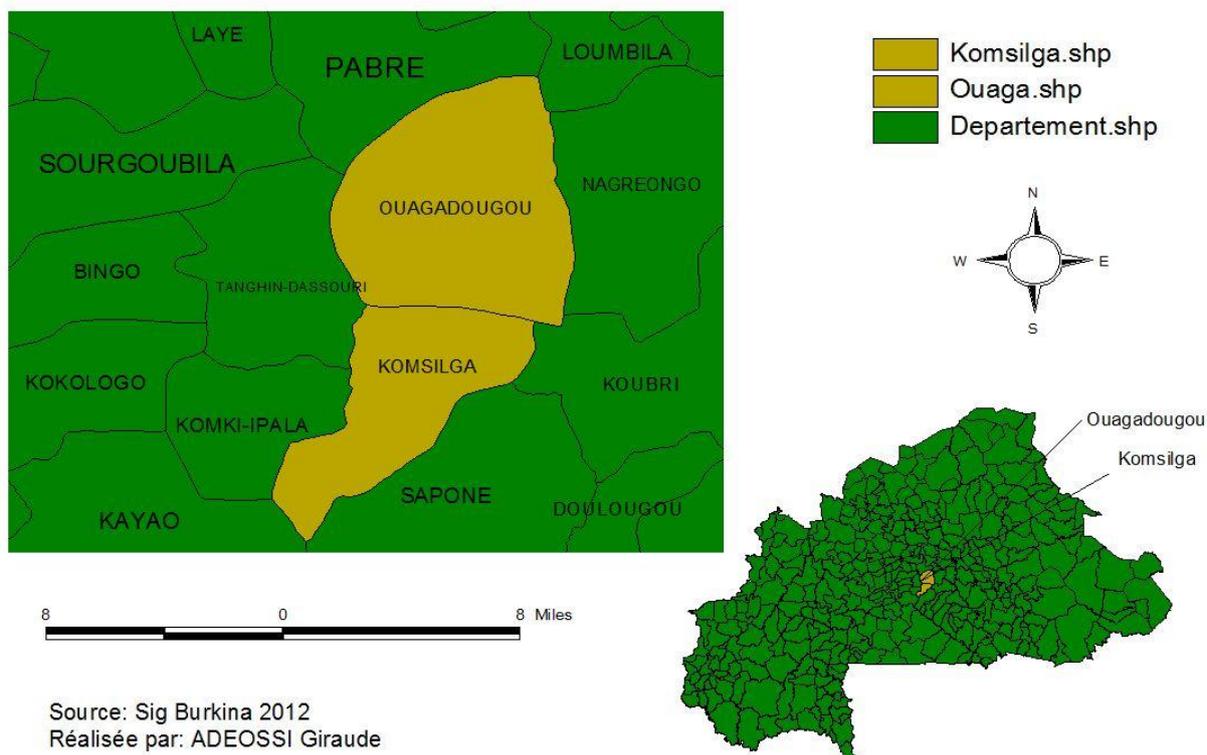


Figure 2: Carte de situation de la zone d'étude

II.2.2. Climat

Le climat est de type soudanien, caractérisé par une saison des pluies qui s'étend de mai à septembre et une saison sèche qui dure d'octobre à avril.

La pluviométrie de cette région, les valeurs minimales sont enregistrées en Février (0,083 mm) et en Décembre (0,057 mm) ; la maximale mensuelle est enregistrée en Aout (218,057 mm) et le total annuel est annuel est 747,403 mm.

Les températures moyennes minimales sont enregistrées en Janvier (25,7 °C) et en décembre (26,3 °C) alors que les températures moyennes maximales sont notées en Mars (32,4 °C) et en Avril (34,5 °C) (ASECNA, 2011).

II.2.3. Hydrographie

La commune de Ouagadougou est située dans le bassin versant de la rivière Massili de direction générale d'écoulement sud-ouest et nord-est matérialisé successivement par les trois lacs de barrages, le marigot de la forêt classée du Barrage et le marigot principal. Le Massili est un affluent du Nakambé. La ville est traversée par quatre affluents temporaires de ce cours d'eau qui sont les émissaires naturels des eaux pluviales. .

II.3.4. Aspects démographiques

Au recensement de 2006, il a été dénombré dans la ville de Ouagadougou 1.499.023 individus. La ville de Ouagadougou compte pour 46,4% de la population urbaine totale du pays (3.181.967) (INSD, 2009). Suivant le plan d'aménagement, la population totale de la zone urbaine de Ouagadougou sera légèrement moins de 3 millions d'habitants en 2020, ce qui représente presque le triple de la population de 2006 (Pöyry, 2010).

III. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

III.1. Définition de la méthanisation

Encore appelée digestion anaérobie, la méthanisation est la transformation de la matière organique en biogaz (principalement gaz carbonique et méthane) par une communauté microbienne fonctionnant en anaérobiose. Cette transformation est répandue dans la nature et se retrouve dans les marais, les intestins d'animaux et de manière générale lors du stockage de la matière organique en absence d'oxygène. (RECORD, 2003).

III.2. Etapes de la méthanisation

Ce sont principalement des bactéries et des archæ (micro-organismes proches des bactéries) qui réalisent ces conversions complexes de la matière organique. En raison de cette complexité, la totalité des transformations n'est pas réalisée par une seule espèce, mais par un ensemble (un consortium) au sein duquel chaque groupe réalise une partie du travail de décomposition (Tableau 15 des annexes). La figure 3 identifie quatre étapes de transformation : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse (Bruffiere et al, 2007).

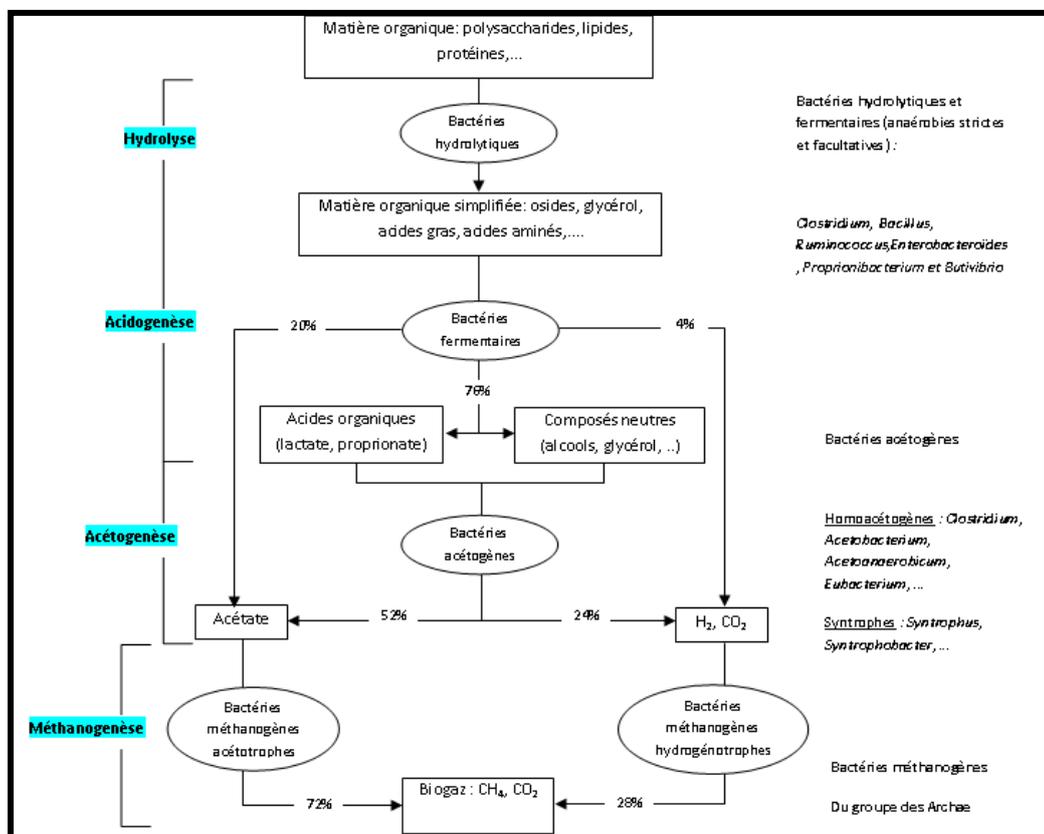


Figure 3: Etapes de la méthanisation

a) L'hydrolyse

Elle est assurée par des bactéries acidogènes hydrolytiques des enzymes extracellulaires. C'est une étape de préparation du substrat pour l'acidogénèse réalisée par les mêmes bactéries (Rouez, 2008). Les molécules organiques complexes sont dégradées en monomères. Ainsi, les composés tels que les polysaccharides (comme la cellulose), les protéines, les lipides sont hydrolysés en sucres simples, en acides aminés et en glycérol et acides gras respectivement (Bruffière et al, 2007).

b) L'acidogénèse

Egalement appelée phase fermentative, elle transforme les différents monomères issus de l'hydrolyse en acides organiques à courte chaîne (2 à 6 carbones) ; les principaux acides produits sont l'acide acétique, l'acide propionique et l'acide butyrique. Elle est généralement rapide en raison du fort taux de croissance des bactéries mises en jeu. Cette flore est essentiellement anaérobie facultative et tolère des pH relativement bas allant jusqu'à 5 ; son développement est ainsi peu contraignant (Gourdon, 2001).

c) L'acétogénèse

L'étape d'acétogénèse recouvre la transformation d'un petit nombre de composés simples en acétate, bicarbonate et hydrogène. Les bactéries qui réalisent cette étape sont désignées comme les bactéries productrices obligées d'hydrogène (OHPA, Obligate Hydrogen Producing Bacteria) et les bactéries mono ou homoacétogènes (Mata-Alvarez, 2003). Cependant, l'accumulation d'hydrogène bloque leur développement des OHPA. L'élimination est réalisée soit par les bactéries méthanogènes consommant l'hydrogène, soit par les bactéries sulfato-réductrices (réduction des sulfates en sulfures) (bruffière et al, 2007).

d) La méthanogénèse

Les espèces méthanogènes utilisent principalement comme substrats l'acétate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène. Leur taux de croissance est plus faible que celui des bactéries acidogènes. Classées parmi les archæ, elles présentent des différences significatives avec les autres bactéries, tant du point de vue de la structure que du matériel génétique. Les espèces méthanogènes les plus courantes sont généralement réparties en deux groupes :

- les acétotrophes responsables de 65 à 70 % de la production de méthane dans les digesteurs utilisant l'acétate.
- les hydrogénotrophes qui utilisent l'hydrogène et le dioxyde de carbone (Pavlostathis et Giraldo-Gomez, 1991; Bastone et al, 2002).

III.3. Paramètres physico-chimiques de la méthanisation

Plusieurs paramètres doivent être contrôlés pour le déroulement optimal de la méthanisation, et un suivi continu de ces paramètres est nécessaire pour maintenir la stabilité du processus, des qualités et quantités de biogaz et de digestat produits (Demuynck *et al.*, 1984) (La Farge 1995) (Sabonnadière 2007) (Moletta 2008) (Frédéric et Lugardon 2007) (Almansour, 2011).

a) Température de digestion

La température est un paramètre physique qui agit directement sur l'activité de micro-organismes anaérobies, et par conséquent sur la stabilité de la digestion, sur les rendements de production de biogaz et sur la performance de traitement. Les différents groupes bactériens responsables des étapes successives de méthanisation ont des températures optimales de fonctionnement différentes. On distingue trois niveaux de température pour le fonctionnement des méthaniseurs :

- psychrophile à basse température 5°C-25°C : utilisée normalement dans les méthaniseurs fonctionnant à la température ambiante. Cette technique exige des longs temps de rétention, et c'est pourquoi elle n'est plus utilisée en Europe.
- mésophile à moyenne température 25°C-38°C : la plupart des digesteurs anaérobies européens opèrent dans cette gamme de température.
- thermophile à haute température au dessus de 50 °C jusqu'à 70 °C : cette technique est moins utilisée en raison des besoins énergétiques importants pour maintenir la température dans le méthaniseur. Il peut arriver toutefois que ce procédé soit utilisé en complément du procédé mésophile, puisque les matières organiques prioritairement dégradées ne sont pas nécessairement les mêmes dans les deux processus(Almansour, 2011).

b) Potentiel hydrogène pH

Le pH est un paramètre chimique important puisque la communauté bactérienne méthanogène est sensible aux variations de pH. Cette communauté requiert un milieu neutre avec une valeur de pH comprise entre 6,5 et 8,5 pour son fonctionnement optimal. L'accumulation d'acides gras volatiles ou d'hydrogène peut produire une acidification dans le méthaniseur et inhiber ainsi la méthanisation. Par voie de conséquence, il est très important de suivre la valeur de pH de l'ajuster si nécessaire en injectant de la soude diluée (Hydroxyde de Sodium) normalement sous forme liquide pour baisser l'acidité du milieu dans le digesteur (Almansour, 2011).

c) L'humidité

Comme pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. L'humidité minimale est de 60 à 70 %. L'humidité des déchets doit être suffisante pour que l'hydrolyse, première étape de la méthanisation, puisse se dérouler normalement. Si au contraire l'humidité est insuffisante, l'acidification se fait trop vite au détriment de la méthanisation, de ce fait le substrat organique doit être très dilué : 85 à 90 % d'eau avec 10 à 15 % de matière sèche (AFEDES, 1982).

d) Homogénéité de substrat

C'est un paramètre important pour optimiser les conditions de la méthanisation en assurant un bon contact entre les micro-organismes et la biomasse traitée et en évitant les gradients de température dans le digesteur. Cette homogénéité peut être garantie par plusieurs voies comme déjà indiqué : un brassage mécanique, une recirculation de substrat ou une recirculation sous pression du biogaz produit (Almansour, 2011).

e) Concentration de matière organique dans les substrats

Le niveau de concentration en matière organique dans les substrats est important pour le fonctionnement de l'installation et pour la prévision des quantités de biogaz produit. Ce paramètre peut être mesuré par la « Demande Chimique en Oxygène » (DCO) avec comme unité courante la masse d'oxygène consommé pour la dégradation biologique (gO_2/l). La mesure de cette grandeur à l'entrée et à la sortie du méthaniseur permet de calculer l'efficacité

du traitement. Ce paramètre peut également être mesuré par le COT « Carbone Organique Total » (Almansour, 2011) ou à travers la matière volatile.

f) Facteurs nutritionnels

Les exigences nutritionnelles des bactéries méthanogènes permettent de les distinguer de l'ensemble des autres bactéries. Globalement, leurs milieux de culture doivent avoir des teneurs en C, N et P dans la proportion 100 - 5 - 1 ou 100 - 4 - 1. Ces bactéries consomment à peu près 30 fois plus de carbone que d'azote, si bien qu'un rapport C/N compris entre 25 et 30 est optimum, il est donc recommandé d'utiliser les déjections des animaux domestiques et de la ferme, ainsi que les excréments humains qui ont un bon rapport C/N (Demuer et al., 1982).

III.4. Principaux inhibiteurs de la méthanisation

Plusieurs composés organiques ou inorganiques peuvent avoir un effet toxique, réversible ou non sur les microorganismes. Les acides gras volatiles (AVG) sont les inhibiteurs organiques les plus rencontrés lors des surcharges organiques (Moletta, 2008). Le développement des bactéries méthanogènes peut aussi être entravé par la présence d'agents inhibiteurs tels que : les antibiotiques et les antiseptiques (détergents et savons), les concentrations élevées en sulfures, en ammoniac et en certains cations (Na^+ , K^+) et en métaux lourds (Cu, Ni, Zn, Pb).

L'azote peut se retrouver en quantité importante dans les effluents d'élevage. Il est réduit sous forme ammoniacale au cours de la méthanisation. Au-delà de quelques grammes par litre, l'azote ammoniacal est inhibiteur de la méthanisation et plus particulièrement de la méthanogénèse acétoclaste (Hansen et al., 1998). Cet effet inhibiteur est dû principalement à la forme libre NH_3 . Il est dépendant du pH et de la température. Ainsi la concentration en NH_3 est plus élevée en conditions thermophiles.

Le sulfure d'hydrogène H_2S est le produit de la réduction du sulfate par les bactéries sulfato réductrices (BSR). Il est toxique pour les microorganismes méthanogènes et génère des problèmes de corrosion qui imposent un traitement du biogaz avant son utilisation (Hulshoff Pol et al., 1998).

III.5. Pertinence du choix de la méthanisation

III.5.1. Principales utilisations du biogaz domestique

Le biogaz est produit pour satisfaire les besoins énergétiques sous pratiquement toutes les formes utiles d'énergie, que ce soit la chaleur, l'électricité ou la force motrice. Il peut ainsi se substituer à de nombreuses formes d'énergie existantes. Toutefois, le biogaz domestique vise principalement les besoins énergétiques primaires liés à la cuisson et l'éclairage dans une moindre mesure.

Le contenu énergétique du biogaz dépend principalement de son contenu en méthane. Ainsi, la présence de dioxyde de carbone, d'azote, de vapeur d'eau et autres gaz rend la combustion du biogaz moins exo-énergique que celle du butane (contenu énergétique environ deux fois plus élevé) ou du méthane pur (plus de deux fois plus élevé). Le tableau 2 présente les différents taux de substitution entre le biogaz et les autres formes d'énergie (SNV, 2012).

Tableau 2: Ratio de substitution

Combustible	Unité (U)	Pouvoir Calorifique primaire	Application principale	Rendement (%)	Production Equivalente KWh/U	Quantité équivalente de biogaz (U/m ³)
Bouse de vache	Kg	2,5	Cuisson	12	0,3	11,0
Bois de chauffe	Kg	5	Cuisson	12	0,6	5,5
Charbon	Kg	8	Cuisson	25	2,0	1,7
Butane	Kg	13,6	Cuisson	60	8,2	0,4
Propane	Kg	12	Cuisson	60	7,2	0,5
Diesel	Kg	12	Moteur	30	3,6	0,9
Electricité	KWh	1	Moteur	80	0,8	4,1
Biogaz	m ³	6	Cuisson	55	3,3	1,0

Source : SNV (2012)

III.6. Différents types de biodigesteurs

Les procédés de méthanisation diffèrent les uns des autres suivant :

- ❖ la teneur en matière sèche :
 - les procédés à voie humide (% matière sèche inférieur à 15%). On retrouve ces types de procédé pour les effluents dits liquides (boues, lisiers, ...). Ils

peuvent être utilisés pour les déchets solides nécessitant alors leur dilution.

- les procédés à voie sèche (% matière sèche entre 15% et 40%). Les procédés en voie sèche ont été développés pour traiter les déchets solides. Ces procédés nécessitent un volume moindre (substrat concentré) mais une bonne maîtrise de la circulation de la matière (pompage et brassage).

❖ la température de réaction :

- la digestion anaérobie mésophile (température moyenne = 35°C ; temps de séjour moyen = 3 semaines)
- la digestion anaérobie thermophile (température moyenne 55 à 60°C ; temps de séjour moyen réduit = 10 à 15 jours)

❖ les modes d'alimentation et d'extraction des déchets :

- les procédés continus : l'alimentation et la vidange du digesteur se font en permanence avec une quantité entrante équivalente à celle sortante. Ils sont bien adaptés au traitement des déchets liquides. Ce sont les plus fréquents car ce sont aussi les moins exigeants en maintenance (figures : b, c, d, e et f).
- les procédés discontinus, dits « batch » : les digesteurs sont remplis puis vidés séquentiellement lorsque la production de biogaz chute ou devient nulle (Figure a).
- les procédés semi-continus : le digesteur est progressivement rempli par des charges successives convenablement réparties dans le temps. La vidange est réalisée lorsque le volume utile du digesteur est atteint et que la production de biogaz n'est plus suffisante (Boulangier, 2011).

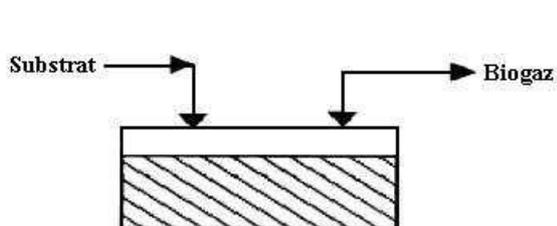


Figure a : Schéma de principe d'un digesteur à alimentation discontinue (batch)

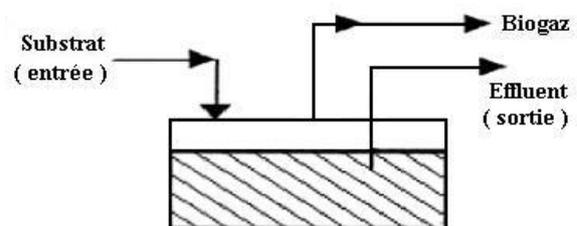


Figure b : Schéma de principe d'un digesteur à alimentation continue sans recyclage de biomasse active (bactéries)

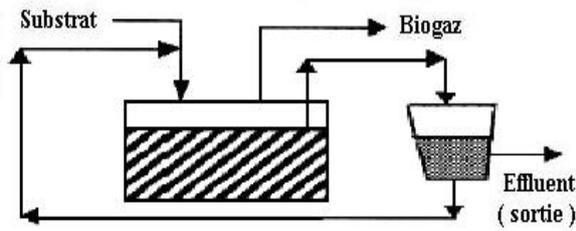


Figure c: Schéma de principe d'un digesteur à alimentation continue avec recyclage de biomasse active (bactéries) à l'extérieur du digesteur

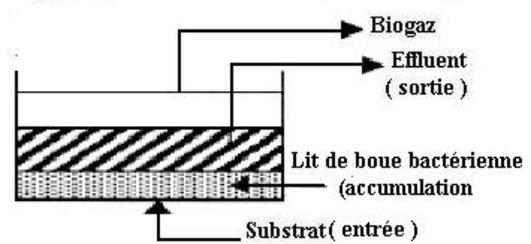


Figure d: Schéma de principe d'un digesteur à alimentation continue avec recyclage de la biomasse active (bactéries) à l'intérieur du digesteur

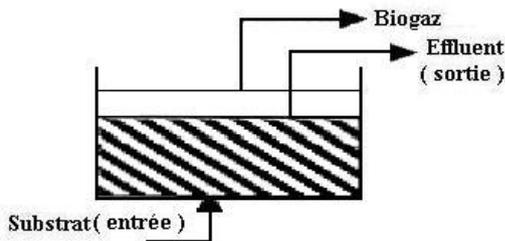


Figure e: Schéma de principe d'un digesteur avec flux de substrat ascendant

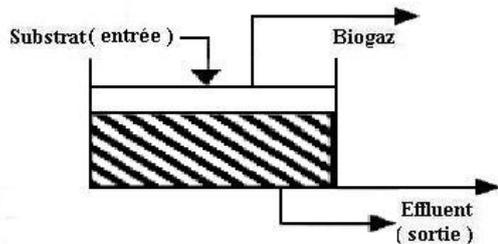


Figure f: Schéma de principe d'un digesteur avec flux de substrat descendant

Figure 4 (a,b,c,d,e et f): Principe de fonctionnement de quelques digesteurs (Scriban, 1985)

III.6.1. Présentation du prototype de biodigesteur du PNB-BF

Partant de l'expérience de la SNV dans la promotion des biodigesteurs en Asie et en Afrique, le prototype GGC 2047 qui est un biodigesteur à dôme fixe de 6m³ convient le mieux au contexte du Burkina Faso. Sa durée de vie est évaluée à vingt (20) ans.

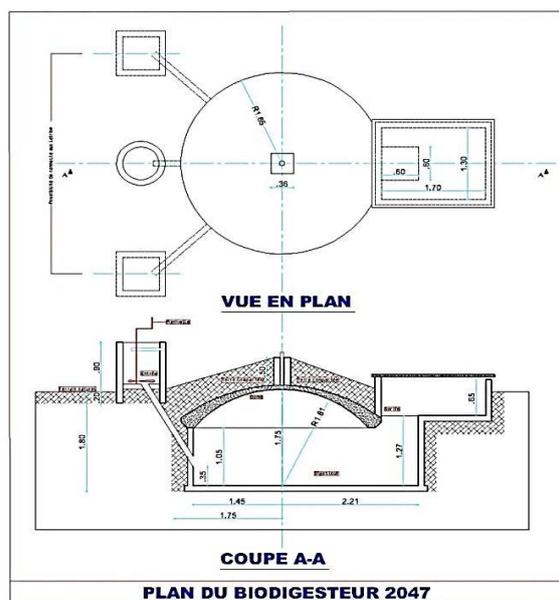


Figure 5: Vue en plan et coupe A-A du biodigesteur (PNB-BF,2009)



Figure 6: Digesteur en construction (PMO/PNB-BF dans SNV, 2012)



Figure 7: Digesteur en exploitation (Cliché Adéossi)

Dès que la construction du biodigesteur est achevée, il doit être rempli d'un mélange de déjections animales et d'eau à parts égales. Pour un biodigesteur de 6 m^3 , ces parts sont de 40 kg de déjections animales et de 40 litres d'eau. Ces deux éléments doivent être bien mélangés avant leur introduction dans le biodigesteur. La production de gaz commence deux à trois semaines après le remplissage du biodigesteur.

Le volume de gaz produit chaque jour est estimé 1500 litres. Ce volume de gaz autorise, soit 3 à 4 heures de cuisson (cuisinière à un foyer. Ce niveau de production de gaz ne suffit pas à satisfaire la totalité des besoins énergétiques d'un ménage de six personnes. Cependant il induit une réduction substantielle de leurs besoins en sources d'énergies conventionnelles (bois, charbon de bois, pétrole).

Les déjections qui conviennent mieux pour la production de biogaz sont celles des bovins et des porcins car elles satisfont à la fois aux exigences quantitative (3 kg/jour/porc et 17,5 kg/jour/vache) et qualitative soit 50 litre de biogaz/kg de déjection de porc et 37,5 litre de biogaz/kg de bouse de vache. La stabulation des animaux préconisée par le programme en offre réellement l'opportunité (PNB-BF, 2009).

III.6.2. Caractéristiques du lisier de porc et de la bouse de vache

La présente étude s'intéresse au lisier de porc et à la bouse de vache qui sont les principaux substrats utilisés pour les biodigesteurs du PNB-BF. Pour un développement maximal, les bactéries doivent vivre entre 38 et 42°C et sans choc thermique (ADEME, 2011). Selon Feilden (1981) et RECORD (2003), la productivité augmente avec la température dans les zones mésophiles (30 à 45°C) et thermophile (55 à 65°C) mais a un effet

régressif entre 45 et 55°C. D'autres caractéristiques des substrats sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3: Caractéristiques des substrats selon différents auteurs

Auteurs	substrats	pH	Matière sèche	Matière volatile	DCO	Production de méthane	Production de biogaz
CAFIPOC, 1996	Lisier de porc	-	1% à 15%	-	22 000 mg/l à 169 000 mg/l	0,3 à 0,6 m ³ CH ₄ /kg de MS avec 55% à 75% de CH ₄ dans le biogaz	0,55 à 0,8 m ³ /kg de MS
Coudure et Castaing (1997)	Lisier de porc	6,78 à 7,36 à l'entrée et 7,42 à 7,89 à la sortie	1,93% à 6% à l'entrée et 1,62% à la sortie	-	14000 mg/l à 60600 mg/l à l'entrée et 11000mg/l à 26900 mg/l Elimination de 30% à 70% de DCO	0,35m ³ CH ₄ /kg DCO dégradé	-
Seydoux et al, (2005)	Lisier de porc	-	7,1%	-	-	-	-
Moller et al (2004) et Frazier et al.(2006)	Lisier de porc	-	10%	80,5%	-	60% à 70% soit 1,44 m ³ /kg à 1,96 m ³ /kg de substrat	2,4 m ³ /kg à 2,8 m ³ /kg de substrat
M'sadak et al, 2010	bouse de vache	6,5 et 7,2	9,4 - 31%	-	-	-	-
I Tou et al, 2001	-	-	-	-	-	0,2 m ³ /kg MS	-
Al seadi (2001)	Lisier de porc	-	-	70-80%	-	0,25-0,50 m ³ /Kg MVS	-
Al seadi (2001)	Bouse de vache	-	-	80%	-	0,20-0,30 m ³ /Kg MVS	-

III.7. Produits de la méthanisation

III.7.1. Le biogaz

La composition des biogaz dépend de l'origine des substrats utilisés et des conditions de traitement. De façon globale, les biogaz contiennent comme composant principal du

méthane, du dioxyde et du monoxyde de carbone, de l'hydrogène sulfuré et de l'eau. Selon leur provenance, ils peuvent aussi contenir des quantités variables d'azote, d'oxygène, de composés aromatiques, de composés organo-halogénés (chlore et fluor) et des métaux lourds (ces trois dernières familles chimiques étant présentes à l'état de traces). Le tableau 4 présente les caractéristiques des biogaz issus de différentes sources.

Tableau 4: Composition des biogaz de différentes sources

Composants Majeurs	Industries de papeteries	CET	STEP	Centre de tri et de compostage	Elevage porcin	Elevage Bovin*
CH ₄ %	79	50,2	67,6	48,7	64,6	60
CO ₂ %	14	41,6	30,9	48,9	24,7	37,5
N ₂ %	3,8	1,12	0,50	0,41	5,63	1,75
H ₂ %	0,002	0,002	0,002	0,050	0,002	2
H ₂ O%	13,9	15,2	13,3	14,4	13,7	-
CO%	12	5	22	10	28	-
H ₂ S et autres	720 ppm	160 ppm	18 ppm	280 ppm	1510 ppm	3%

Source : (INERIS, 2006), *Moletta (2003)

La composition du biogaz varie également à l'intérieur d'une même filière. Il est à noter aussi que la forte dispersion des données ne permet pas de classer les biogaz suivant leur composition (INERIS, 2006).

III.7.2. Le digestat

Le digestat est la matière résiduelle humide et riche en matière organique partiellement stabilisée obtenue après la digestion anaérobie. Il est généralement envisagé le retour au sol du digestat après éventuellement une phase de maturation par compostage. La particularité du digestat est qu'il s'agit d'un fertilisant organique riche en azote minéral et éléments minéraux. Une part importante de cet azote est directement disponible et rapidement valorisée par la culture en place.

IV. MATERIEL ET METHODES

La méthodologie adoptée pour atteindre nos objectifs est la suivante :

- une recherche documentaire d'une durée d'un mois. Elle nous a permis de faire une synthèse de quelques études se rapportant à la méthanisation des déchets en général et à la valorisation du lisier de porc et la bouse de vache en particulier.
- les travaux de terrains déroulés pendant deux mois du 1^{er} Avril au 31 Mai 2013.

Ils se sont effectués en deux étapes : l'identification des sites puis la collecte des substrats et du biogaz et leur caractérisation aux laboratoires LEDES et LBEB de la Fondation 2iE.

- le traitement et l'analyse des données collectées.

IV.1. Matériel d'analyse

Le matériel utilisé se présente comme suit :

- quatre biodigesteurs de type GCC amélioré de 6m³ de volume ;
- des flacons étiquetés pour le prélèvement des substrats ;
- des sacs de gaz spéciaux de 1000 ml de volume pour collecter le biogaz produit sur chaque site ;
- un pH-mètre pour la mesure du pH ;
- une étuve de séchage à contrôle thermostatique, équipée d'un système de ventilation et permettant le maintien d'une température de (105°C) ;
- une balance analytique possédant une précision de 1 mg;
- des creusets résistants à 105 °C pour la détermination de la teneur en matière sèche et à 550 °C pour la détermination de la matière volatile.
- des boîtes de pétri et des milieux de cultures pour la microbiologie ;
- un micro chromatographe en phase gazeuse pour la caractérisation du biogaz ;
- du logiciel Microsoft Office pour la saisie, le traitement et l'analyse des données ;
- du logiciel Arcview3.2a pour l'élaboration des cartes.

IV.2. Méthodes d'analyse

Nous distinguons les méthodes de caractérisation des substrats et du biogaz.

IV.2.1. Caractérisation des substrats

La caractérisation des substrats, a consisté à mesurer in situ ou au laboratoire (figures 8 et 9) les paramètres physicochimiques suivants :

- Le potentiel Hydrogène **pH** mesure de l'acidité de l'eau c'est-à-dire de la concentration en ions d'hydrogène (H⁺);
- le taux de matière sèche (**MS**) : c'est le rapport de la matière sèche **MS** (g) sur la masse de l'échantillon (g) ; elle s'exprime en pourcentage et constitue à l'instar de la DBO ou de la DCO un important paramètre de dimensionnement.

La teneur en matière sèche (MS) et la teneur en Matières sèches Volatiles (VS) sont calculées à partir des formules suivantes :

$$\text{MS (\%)} = [(M_2 - M_0)/(M_1 - M_0)] * 100 \quad \text{MVS (\%)} = [(M_2 - M_3)/(M_2 - M_0)] * 100$$

Avec M_0 : Masse du creuset ; M_1 : Masse de l'échantillon dans le creuset ; M_2 : Masse en sortie d'étuve ; M_3 : Masse en sortie du four.

- la demande chimique en oxygène **DCO** : c'est la consommation en dioxygène par les oxydants chimiques forts pour oxyder les substances organiques d'un échantillon d'eau usée. Elle est mesurée par oxydation chimique en milieu acide sulfurique fort par un excès de dichromate de potassium (K₂Cr₂O₇) pendant deux heures. Ensuite la lecture a été faite avec le Spectrophotomètre DR 2000 HACH.
- le phosphore total (**PT**) est dosé avec le molybdovandate après minéralisation de l'échantillon dans de l'acide 5,25 N. la lecture est faite au spectrophotomètre DR 2000 HACH ;
- l'ortho phosphate **PO₄³⁻** : C'est la forme minérale dissoute prépondérante du phosphore sous laquelle il se trouve dans les boues. La mesure a été faite en utilisant la méthode Phos Ver 3 et la lecture au spectrophotomètre DR 2000 HACH ;
- l'ammonium (**NH₄⁺**) : c'est la forme minérale la plus assimilable par les plantes. Elle est dosée avec le réactif de Nesler et la lecture est faite au spectrophotomètre DR 2000 HACH ;
- le potassium **K⁺** et le Sodium **Na⁺** sont mesurés par spectrophotométrie d'absorption atomique après dissolution des cendres de boues dans un volume (100ml) de HNO₃ 0,2% ;
- Les coliformes fécaux, les streptocoques ont été suivis afin de vérifier si la manipulation des boues fraîches et des digestats présente des risques sanitaires pour

l'homme.

Les Coliformes fécaux sont cultivés sur des milieux de culture Chromocult et incubés à une température de 44°C pendant 24 heures.

Les Streptocoques fécaux sont cultivés sur un milieu Slanez ; la température et la durée d'incubation sont respectivement 37 °C et 48 heures.



Figure 8: Mesure de paramètre in situ



Figure 9: Mise d'échantillons à l'étuve

IV.2.2. Caractérisation du biogaz

❖ Composition du biogaz

La composition du biogaz est déterminée à l'aide d'un micro-chromatographe en phase gazeuse (Varian CP 4900). Chaque analyse est réalisée trois fois. Le chromatographe est équipé de deux voies analytiques indépendantes composées chacune d'un micro-injecteur, d'un four, d'une colonne et d'un nano-détecteur à conductivité thermique: la première contient la colonne CP-PoraPLOT Q-HT (10 m x 0,53 mm) pour l'analyse du CO, O₂, N₂ et H₂, la seconde contient la colonne CP-Molsieve 5A (10 m x 0,53 mm) pour l'analyse du CO₂, CH₄, (Limam, et al **2010**). Les conditions chromatographiques sont présentées dans le tableau 6. Les figures 10 et 11 illustrent le prélèvement et l'analyse du biogaz.

Tableau 5: Condition d'analyse des biogaz par micro-GC

Colonne	Gaz détectés	Température °C	
		colonne	Injecteur
CP-PoraPLOT Q-HT	CO, O ₂ , N ₂ et H ₂ ,	130	130
CP-Molsieve 5A	CO ₂ , CH ₄ ,	60	30



Figure 10: Prélèvement du biogaz



Figure 11: Analyse du biogaz au Micro GC

❖ Estimation du volume de biogaz

Il est plus courant de s'intéresser à la biodégradabilité des déchets ou à la quantité de matière dégradée pour estimer au mieux le potentiel d'un substrat. Cette approche consiste donc à utiliser un taux moyen pondéré de production de CH_4 ou de biogaz affecté à la quantité de matière dégradée (Boulanger, 2011). Les valeurs de la littérature pour le potentiel de la production de biogaz (constitué de 60 % de CH_4) sont comprises entre 200 à 350 $\text{m}^3 \text{ m}^3/\text{T}$ de MSV pour la bouse de vache et 250 à 500 m^3/T de MSV pour le lisier de porc (Moletta, 2003). La production de biogaz est évaluée sur la base du chargement journalier de 80 kg.

V. RESULTATS

V.1. Caractéristiques physico-chimiques des substrats d'alimentation

Après la caractérisation des échantillons de substrats, les valeurs moyennes de quelques paramètres qui déterminent le dimensionnement des biodigesteurs sont consignées dans le tableau 6.

Tableau 6: Caractéristiques physico-chimiques des substrats

Paramètres	Valeurs	Substrat porcin		Substrat bovin	
		Ponsontenga	Bassemyam II	Bassemyam I	Nioko II
pH	Entrée	7,0	6,4	6,8	6,5
	Sortie	7,6	7,5	7,1	7,3
DCO (mg O ₂ /l)	Entrée	66880	65160	60760	79520
	Sortie	40140	41760	36500	53000
MS (%)	Entrée	12,94	11,68	10,52	11,88
	Sortie	10,54	5,15	6,65	11,47
MVS (%) de MS	Entrée	81,87	85,79	74,76	85,73
	Sortie	67,13	73,40	58,10	75,19

L'analyse du tableau 6 montre que globalement, les valeurs du pH se situent entre 6.4 et 7 à l'entrée du digesteur et entre 7,1 et 7,6 à la sortie.

La DCO moyenne obtenue dans l'influent pour les substrats porcins est 66880 mg O₂/l (Ponsontenga) et 65160 mg O₂/l (Bassemyam II) alors que les substrats bovins enregistrent une DCO qui varie de 60760 mg O₂/l (Bassemyam I) et 79520 mg O₂/l (Nioko II). Le taux de dégradation de la DCO varie de 33,35 % à 39,98 % suivant les sites.

Les valeurs moyennes de MS sont comprises entre 10,52 % et 12,94 % pour l'influent et entre 5,15% et 11,47% l'effluent ; toutefois on remarque des valeurs maximales au-delà de 15% admissibles pour les procédés continus (CAFIPOC, 1996).

Les MVS sont comprises entre 74,76% et 85,79% dans l'influent et entre 58,10 % et 75,19% dans l'effluent. Le taux de dégradation des MVS varie de 10,54 % à 16,66 %.

V.2. Composition du biogaz par type de substrat

Le tableau 7 présente la composition du biogaz obtenu au niveau de chaque site.

Tableau 7: Composition du biogaz par site d'échantillonnage

Substrat	Site	H ₂ (%)	O ₂ (%)	N ₂ (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
Porcin	Pons	0,004	3,158	8,271	52,023	35,839
	Bass II	0,003	2,199	4,243	56,918	35,941
bovin	Bass I	0,003	2,196	5,041	49,973	41,810
	Niok II	0,001	3,815	10,638	46,838	37,364

Avec : Pons : Ponsontenga, Bass II : Bassemyam II, Bass I : Bassemyam I, Niok II: Nioko II

La qualité du biogaz étant déterminée par sa teneur en méthane, les plus meilleures teneurs en CH₄ sont enregistrées avec les substrats d'origine porcine, soit en moyenne 57 % à Bassemyam II et 52 % à Ponsontenga. Pour les substrats d'origine bovine cette teneur est de 50 % et 47 % respectivement pour Bassemyam I et Nioko II.

Les moyennes des pourcentages des gaz caractéristiques selon les types de substrat sont illustrées par les figures 11 et 12.

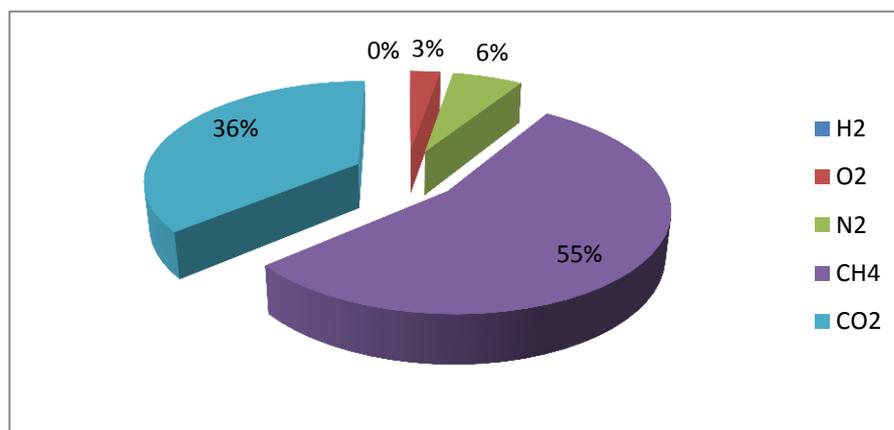


Figure 12: Composition moyenne du biogaz des substrats porcins

Promotion 2013

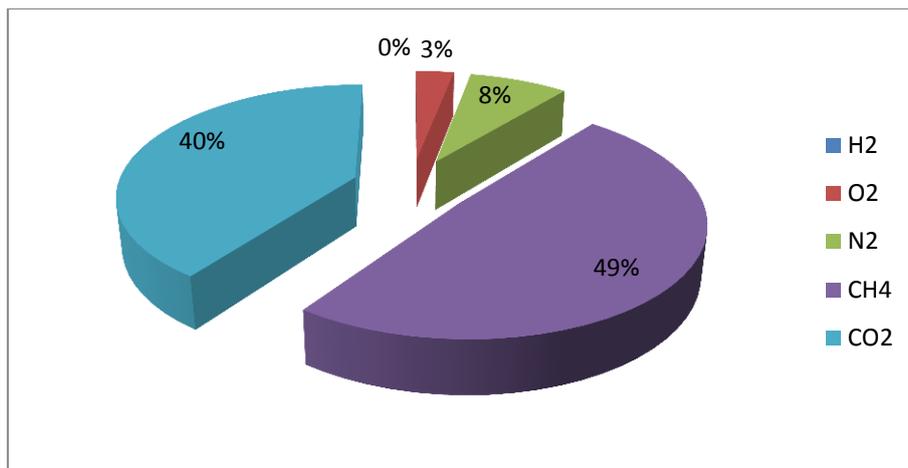


Figure 13: Composition moyenne du bigaz des substrats bovins

En synthèse on obtient des valeurs moyennes de 54,47% de CH₄ et 35,89% de CO₂ avec les substrats porcins (Figure 12) puis 48,41% de CH₄ et 39,59% de CO₂ avec les substrats bovins (Figure 13).

V.3. Estimation de la production de biogaz

Les figures (14, 15, 16 et 17) illustrent l'évolution de la production de biogaz suivant les sites.

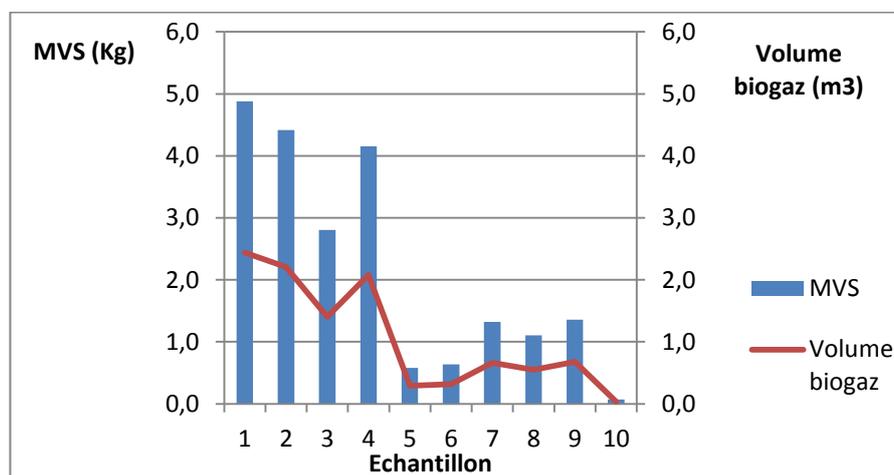


Figure 14: Production de biogaz sur le site de Possontenga

Promotion 2013

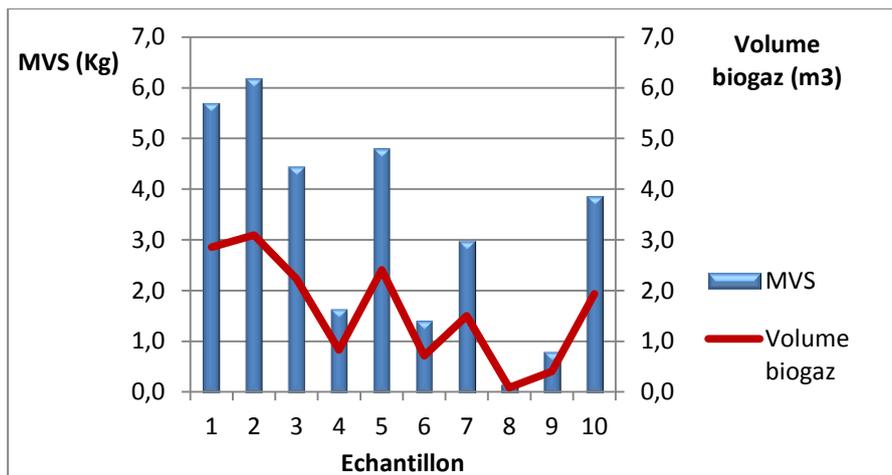


Figure 15: Production de biogaz sur le site de Bassemym II

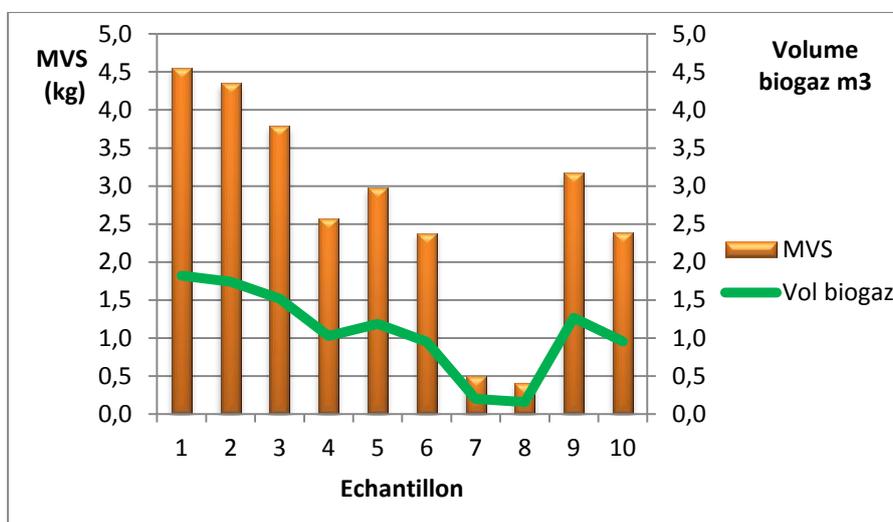


Figure 16: Production de biogaz sur le site de Bassemym I

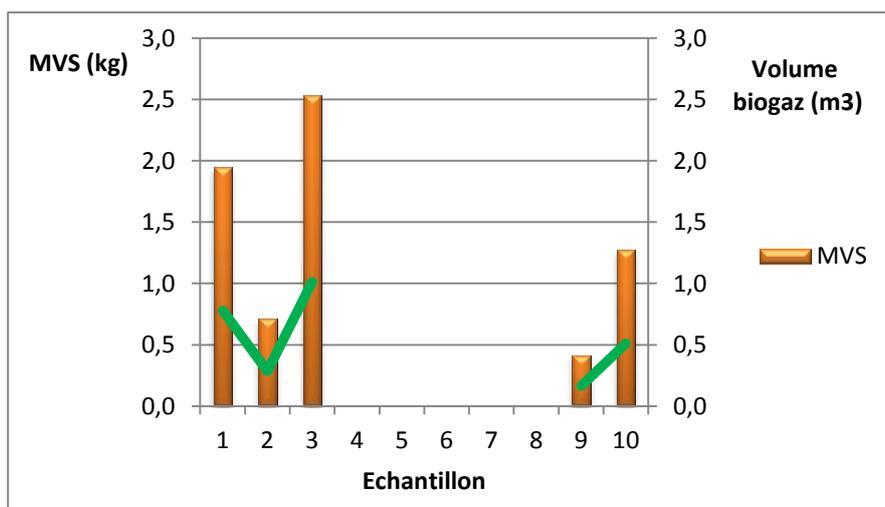


Figure 17: Production de biogaz sur le site de Nioko II

En considérant les figures 14, 15, 16 et 17 on remarque que la production de biogaz est

proportionnelle à la quantité de matière volatile dégradée.

De manière générale, on constate sur l'ensemble des graphes une diminution aussi bien de la quantité de matière volatile que du volume de biogaz du premier jour au septième jour d'échantillonnage; la tendance à l'augmentation reprend du huitième au dixième échantillon. La particularité du site de Nioko II est que les prélèvements n'ont été faits que cinq fois car la ménagerie a arrêté le chargement pendant un mois. Les points sans valeurs correspondent à la période où l'ouvrage n'était pas chargé.

Les productions journalières les plus élevées de biogaz sont obtenues pour les substrats porcins notamment sur les sites de Ponsontenga (2,4 m³/jour) et Bassemyam II (3,1 m³/jour); les productions moyennes sont respectivement pour ces deux sites 1,1 m³/jour et 1,6 m³/jour.

Pour les substrats bovins les productions journalières maximales sont de 1,8 m³/jour pour Bassemyam I et 0,8 m³ pour Nioko II, les productions journalières moyennes étant de 1,1 m³/jour et 0,6 m³/jour.

V.4. Evaluation de la qualité des digestats

La qualité est évaluée du point de vue de microbiologique et agronomique.

V.4.1. Microbiologie

L'analyse des substrats à l'entrée et à la sortie des digesteurs donnent des informations sur les indicateurs de contamination fécale présentées dans le tableau 9.

Tableau 8: Microbiologie des substrats

Sites	Echantillons	Coliformes fécaux			Streptocoques fécaux		
		Nombre (UFC/100 ml)	Abattement		Nombre (UFC/100 ml)	Abattement	
			(%)	Ulog		(%)	Ulog
Ponsontenga	Entrée	2,60 10 ⁶	99,61	2,41	3,2 10 ⁶	96,88	1,5
	Sortie	0,01 10 ⁶			0,1 10 ⁶		
Bassemyam I	Entrée	2,08 10 ⁶	99,82	2,74	0,25 10 ⁶	99,96	3,4
	Sortie	0,38 10 ⁴			0,01 10 ⁴		
Bassemyam II	Entrée	1,56 10 ⁶	99,81	2,73	10,1 10 ⁶	97,52	1,6
	Sortie	0,29 10 ⁴			0,25 10 ⁶		

Nioko II	Entrée	$2,2 \cdot 10^6$	99,1	2,04	$0,3 \cdot 10^6$	99,33	2,18
	Sortie	$0,02 \cdot 10^6$			$0,2 \cdot 10^4$		

Sur l'ensemble des sites, le nombre coliformes fécaux à l'entrée varie de $1,56 \cdot 10^6$ UFC/100 ml à $2,60 \cdot 10^6$ UFC/100 ml. A la sortie, il est compris entre $0,29 \cdot 10^4$ UFC/100 ml à $0,02 \cdot 10^6$ UFC/100 ml soit une performance éliminatoire de 99,1% soit 2,04 Ulog à 99,82% soit 2,74 Ulog.

S'agissant des streptocoques fécaux, le nombre à l'entrée des digesteurs est compris entre $0,25 \cdot 10^6$ UFC/100 ml et $10,1 \cdot 10^6$ UFC/100 ml ; Au sortir des digesteurs il n'est que de $0,01 \cdot 10^4$ UFC/100 ml à $0,25 \cdot 10^6$ UFC/100 ml soit un taux d'élimination variant entre 96,88% et 99,96% soit entre 1,5 Ulog et 3,4 Ulog.

V.4.2. Valeur agronomique

La valeur fertilisante est mesurée à travers les paramètres consignés dans le tableau 10.

Tableau 9: Valeurs fertilisantes des substrats

Sites	Ponsontenga		Bassemyam I		Bassemyam II		Nioko II	
Paramètres	Entrée	Digestat	Entrée	Digestat	Entrée	Digestat	Entrée	Digestat
PT (mg/l)	346,67	506,67	986,67	266,67	640,00	506,67	360,00	480,00
PO_4^{3-} (mg/l)	776,00	932,00	848,00	422,67	813,33	612,00	560,00	560,00
NH_4 (mg/l)	1066,67	1112,00	685,33	776,00	810,67	610,67	552,00	788,00
K^+ (mg/g)	1,051	1,254	1,133	0,806	0,553	0,545	0,830	1,370
Na^+ (mg/g)	0,491	0,420	0,331	0,169	0,651	0,518	0,434	0,456

Les éléments majoritaires solubles ammonium NH_4^+ , phosphore PT et potassium K^+ déterminent la valeur fertilisante. Ainsi, concernant le NH_4^+ les concentrations dans les digestats varient de 610,67 mg/l à 1112 mg/l. Pour le PT on enregistre les concentrations de 266,67 mg/l à 506,67 mg/l; les concentrations de K^+ sont comprises entre 0,806 mg/g et 1,370 mg/g et celles du Na^+ se situent entre 0,169 mg/g et 0,518 mg/g. En dehors de quelques fluctuations, les concentrations sont du même ordre à l'intérieur d'un même site.

VI. DISCUSSION

Les substrats

Les biodigesteurs de PNB-BF sont installés pour des ménages pratiquant l'élevage de porcs et ou de bœufs et qui peuvent disposer d'une quantité suffisante de déjections (substrats) tant pour le chargement initial que pour le chargement quotidien (40 kg de substrat pour 40kg d'eau). La caractérisation des substrats à l'entrée et à la sortie nous a permis de noter que les valeurs de pH (6,4 à 7 à l'entrée et 7,1 à 7,8 à la sortie) se situent dans la plage des valeurs recommandées (6,8 à 7,5) pour la méthanisation ; l'optimum se situant autour du pH de neutralité (Roque, 1981).

La charge en terme de DCO obtenue variable entre 60760 mg O₂/l et 66880 mg O₂/l, avec un taux de dégradation de 40% est en accord avec les valeurs rencontrées dans la littérature; CAFIPOC (1996) enregistre des DCO à l'entrée des digesteurs variant de 22000 mg O₂/l à 169 000 mg O₂/l avec une réduction de 50% à la sortie. La DCO des substrats bovins et porcins varie entre 20000 mg O₂/l et 139 mg O₂/l (CEMAGREF 1994,2005).

Toutefois 11500 mg O₂/l à 26900 mg O₂/l sont obtenus par Coudure et Castaing (1997). Leurs valeurs sont faibles mais proviennent de l'analyse des lisiers fortement dilués dont la matière sèche MS maximale est égale à 2,5% alors que nous avons obtenu dans le cadre de cette étude une matière sèche moyenne MS de 12,3 % et 11,5% respectivement pour les substrats porcins et bovins avec des maximums de 18,58% et 16,59% proches des données de *M'sadak et al, (2010)* (MS=9,4% pour les bouses noires à 31% pour la bouse fraîche de vache) en Tunisie et de Moller et al (2004) et *Frazier et al.(2006)* en France (MS=10% pour le lisier de porc). Il faut souligner le fait que la charge en matière sèche et en DCO est très variable suivant le système d'élevage, de l'alimentation et l'état physiologique des animaux (*Levasseur, 1998*). Ainsi la quantité d'eau est plus importante dans les systèmes modernes (hors sol) que dans les systèmes traditionnels (sur sol) ; l'alimentation dans les systèmes modernes est faite de soupe ou de farine alors qu'elle est faite de tourteau de céréale au niveau des élevages objet de cette étude. Dans un élevage, les femelles allaitantes (16.4 l/j. animal) produisent plus de lisiers que les femelles gestantes (15 l/j. animal), les porcelets et les porcs en engraissement (3,2 l/j. animal) et post sevrage (1,8 l/j. animal) (*Levasseur, 1998*). A cela il faut ajouter le rapport bouse-eau (1;1) qui détermine la densité ou la concentration du mélange entrant et qui n'est pas souvent respecté.

La Composition et l'estimation du volume de biogaz

La qualité du biogaz est appréciée essentiellement par le pourcentage de méthane (CH₄) qu'il contient. Un biogaz est d'autant meilleur que son pourcentage en méthane est élevé (Akrou, 1992).

Les compositions en CH₄ des biogaz 54,5 % et 48,4 % obtenues respectivement pour les substrats porcins et bovins sont en accord avec la composition générale du biogaz (50% à 70 % de CH₄) (Lagrange, 1979). Les valeurs obtenues sont légèrement inférieures aux valeurs de Moletta (2003) qui est de 60% et aux prévisions de la SNV qui est de 70% pour les deux types de substrats. Les concentrations en CH₄ peuvent être nettement plus élevées suivant les conditions avec d'autres substrats. Nous pouvons citer Konaté et al (2013) qui obtiennent 80,5% en conditions sahéennes pour le traitement des eaux usées domestiques et Picot et al (2003) qui relèvent 83% de CH₄ en conditions méditerranéennes pour le traitement des eaux usées urbaines.

Cette situation de faibles taux de CH₄ constatés au cours de la présente étude pourrait s'expliquer par le fait que plusieurs valeurs de la littérature sont obtenues de manière expérimentale et donc dans des conditions optimisées pour avoir les meilleurs rendements possibles. Il serait intéressant d'en faire de même dans un contexte sahéen au Burkina Faso afin de mieux rapprocher les résultats.

Quant aux taux d'oxygène et d'azote (2,678% et 6,257% pour les substrats porcins) et (3,005% et 7,839% pour les substrats bovins) retrouvés dans nos échantillons de biogaz, ils pourraient laisser supposer des entrées d'air dans les digesteurs ou dans les sacs lors de l'échantillonnage. Une faible entrée d'air dans les digesteurs induirait la coexistence de la digestion anaérobie en grande part et la dégradation aérobie en faible part mais justifierait les forts taux de CO₂ relevés sur les différents sites : 35,890% avec les substrats porcins et 39,587%.

Concernant la production journalière de biogaz, elle est en moyenne de 1,066 m³/jour à Ponsontenga, 1,083 m³/jour à Bassemyam I, 1,606 m³/jour à Bassemyam II et 0,551 m³/jour à Nioko II (Tableau 10). Ces volumes sont faibles eu égard à la quantité de boue introduite quotidiennement dans les digesteurs ; mais les maxima obtenus respectivement pour ces sites (2,44 m³/jour, 1,82 m³/jour, 3,09 m³/jour et 1,013 m³/jour) sont plus en accord avec les prévisions de départ qui sont de 1,6 m³/jour à 2,4 m³/jour pour les digesteurs de 6 m³ (SNV, 2008). Toutefois les valeurs moyennes obtenues par site correspondent aux prévisions de Amahrouch (2008) qui estime que la production de biogaz est de 0,18m³/m³de digesteur/jr ;

ce ratio, affecté au 6 m³ de digesteur nous permet d'avoir une production moyenne de 1,08 m³.

Par ailleurs, les fluctuations des valeurs constatées traduisent des périodes de hausse et de baisse de la production de biogaz illustrées par les figures (14,15,16 et 17). La tendance générale de diminution observée trouverait sa cause dans la baisse de la qualité et la quantité de l'alimentation des animaux ; la période correspondant à la saison sèche. Aussi, l'irrégularité du chargement quotidien et la difficulté de respecter le ratio de mélange (1 unité de boue pour une unité d'eau) contribueraient aux fluctuations des valeurs obtenues. La tendance à l'augmentation observée à partir du 7^{ème} jour d'échantillonnage serait due à l'arrivée des premières pluies entraînant progressivement une disponibilité des ressources alimentaires.

Qualité sanitaire des digestats

Sur le plan sanitaire, le taux d'élimination des coliformes fécaux varie de 99,1% à 99,82% soit 2,04 Ulog à 2,74 Ulog et celui des streptocoques varie entre 96,88% et 99,96% soit entre 1,5 Ulog et 3,4 Ulog. Ces performances sont importantes et voisines de celles de trouvées par Traoré (2011), 99%, à l'issue de la méthanisation des déchets solides ménagers et assimilés et sont dues à plusieurs facteurs tels que le temps de séjour et la température. Plus la température augmente plus le temps requis pour éliminer les entérobactéries (coliformes et streptocoques fécaux) diminue. La digestion anaérobie thermophile permet une réduction rapide des *Escherichia coli*. Leur population diminue de 90% en moins d'une heure (Bendixen 1999). La température moyenne ambiante de 39 °C dans le mois d'avril et 36 °C en mai (ASECNA, 1981 à 2011), et le temps de rétention hydraulique de 60 jours suffiraient à éliminer une part importante des pathogènes comme l'indique le tableau.

Qualité agronomique des digestats

Les concentrations obtenues en NH₄⁺ dans les digestats (610,67 mg/l à 1112 mg/l), de PT (266,67 mg/l à 506,67 mg/l) et de PO₄³⁻ (422,67 mg/l à 932 mg/l) bien que peu comparables aux valeurs obtenues (NH₄⁺ = 23mg/g et PT= 16 mg/g) par Oost et De Tofoli (2011) semblent assez importante. Des essais sur des cultures céréalières et sur des légumineuses permettraient d'évaluer réellement la valeur fertilisante des digestats.

Par les concentrations de K⁺ (0,806 mg/g à 1,370 mg/g) et du Na⁺ (0,169 mg/g à 0,518 mg/g) sont inférieures aux valeurs : (K⁺=40 mg/g et Na⁺=7 mg/g) enregistrées par Oost et De Tofoli (2011). Ce constat s'expliquerait par l'alimentation des animaux qui serait pauvre en K⁺ et Na⁺ ou une non étanchéité des bassins de sortie entraînant des pertes de ces éléments.

VII. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Il ressort de cette étude que la composition en méthane du biogaz est 52 % à Ponsontenga, 57 % à Bassemyam II soit en moyenne 54,5 % pour les substrats porcins et 50 % à Bassemyam I et 47 % soit 48,5 % pour les substrats bovins. La production moyenne de biogaz pour chacun de ces sites est respectivement de 1,066 m³/jour, 1,606 m³/jour, 1,083 m³/jour et 0,551 m³/jour.

Sur le plan sanitaire l'abattement des coliformes fécaux, varie d'un site à l'autre entre 2,04 Ulog à 2,74 Ulog et celui des streptocoques varie entre 1,5 Ulog et 3,4 Ulog. La manipulation des digestats présenterait des risques sanitaires limités.

Sur le plan agronomique les digestats présentent des concentrations intéressantes en NH₄⁺ (610,67 mg/l à 1112 mg/l) en PT (266,67 mg/l à 506,67 mg/l) en PO₄³⁻ (422,67 mg/l à 932 mg/l) et en K⁺ (0,806 mg/g à 1,370 mg/g) dont l'effet sur le rendement des cultures vivrières mériterait d'être évalué.

Ainsi nous formulons les recommandations suivantes :

- ❖ pour l'amélioration de la qualité du biogaz et de la production de biogaz :
 - l'utilisation des boues fraîches et le respect du ratio (1 volume de boue pour 1 volume d'eau) le chargement quotidien ;
 - l'évaluation expérimentale du pouvoir méthanogène des déjections suivant différents essais de ratio de mélange bouse-eau afin de disposer de données exploitables dans le contexte sahélien ;
- ❖ pour une meilleure connaissance de la qualité sanitaire des boues et des digestats :
 - évaluer l'abattement sur les salmonelles les bactéries sporulées telles que les Clostridium, les œufs d'helminthes et les kystes de protozoaires;
- ❖ pour une meilleure utilisation des digestats :
 - prévoir une séparation des phases solide et liquide afin de faciliter le compostage du premier et l'utilisation optimale des substances dissoutes ;
 - ou procéder directement à l'épandage dès la sortie du digesteur en vue de préserver les caractéristiques des digestats ;
 - effectuer des essais sur les cultures vivrières dans le but de voir l'effet sur le rendement ;
 - évaluer la teneur en métaux lourds et la capacité de bioconcentrations des cultures pour lesquelles les digestats sont appliqués.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFEDES 1982. Photosynthèse - Biomasse – Energie – Ressources et Techniques’, Collection des Cahiers de l’AFEDES, N°6, Ed 1982.
- Akrouit J. 1992. Étude énergétique de la fermentation méthanique des fientes de volailles : Optimisation des facteurs influant et modélisation du système. Thèse de Doctorat, École Nationale des Ingénieurs de Tunis, Tunisie.
- Almansour, E. 2011. Bilans énergétiques et environnementaux de filières biogaz : Approche par filière-type. Thèse de doctorat UNIVERSITE BORDEAUX 1. 147p.
- Al Seadi T. 2001. Good practice in quality management of AD residues from biogas production. Report made for the International Energy Agency, Task 24- Energy from Biological Conversion of Organic Waste. Published by IEA Bioenergy and AEA Technology Environment, Oxfordshire, United Kingdom.
- Amahrouch, A. 2008. Le Biogaz. Présentation PowerPoint, Centre de Développement des Energies Renouvelables.
- ATEE, 2011. Guide de bonnes pratiques pour les projets de méthanisation. 117p.
- Batstone D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders WTM, Siegrist H., Vavilin V.A., Anaerobic Digestion Model N°1 (ADM1). International Water Association Scientific and Technical Report n°13, London, UK, IWA Publishing, 2002, 68 p.
- Bendixen, 1999. Hygienic safety: results of scientific investigations in Denmark (sanitation requirements in Danish biogas plants). Universität Hohenheim, Stuttgart. IEA Bioenergy Workshop, Hohenheim, Germany, p. 27–47
- Bruffiere et al, 2007, Guide méthodologique pour l’exploitation d’unités de méthanisation de déchets solides. 40p.
- CAFIPOC, 1996. Traitements des effluents de porcherie en zone caraïbe. Rapport CIRAD-EMVT n° 96059 Décembre 1996.
- De La Farge B., 1995. Le Biogaz. Masson éd, Paris.
- Demuer A. et al., 1982. ‘*Conversion Bioénergétique*’, Ed. Lavoisier, 311 p., Paris.
- Demuyneck, M., Nyns, E. J., & Palz, W. (1984). Biogas Plants in Europe : A Practical Handbook (D. Reidel). Dordrecht / Boston / Lancaster, p.361.
- Feilden N. E. H., 1981 - A note on the temperature for maximum net gas production in an anaerobic digester system. *Agric. Wastes*, 3, 75-79.

- Gourdon R., Traitements biologiques des déchets. Techniques de l'ingénieur, traité environnement, G2 060, 2001, pp. 1-14.
- Gourdon R., Aide à la définition des déchets dits biodégradables, fermentescibles, méthanisables Association RECORD, n°00-0118/1A, 2002, 151 p.
- GTZ, 2007. Feasibility study for a National Domestic Biogas Programme in Burkina Faso.
- Hansen KH, Angelidaki I, Ahring BK (1998). Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia. *Water Res.*, 32 (1): 5-12.
- Hulshoff Pol LWH, lens PNL, Stams AJM, Lettinga G (1998). Anaerobic treatment of sulphate-rich wastewaters. *Biodegradation*, 9 (3-4): 213-224
- INERIS, 2006. Etude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel. Réf. : INERIS – DRA – N° 46032 – 2006-JBr/Biogaz./
- Konate Y., Maiga A. H. , Casells C. & Picot B., 2013. Biogas production from an anaerobic pond treating domestic wastewater in Burkina Faso.
- Lagrange B., 1979-Biométhane, Principes – Techniques – Utilisations', Ed. Edisud, 246 p.,
- MAP, 2009: Le secteur de l'énergie au Burkina Faso, rapport général de synthèse.
- MEF, 2006: Recensements général de la population et de l'habitation de 2006.
- Moletta R. 2008. La méthanisation. 2^{ème} édition. 552 p.
- Monzambe M., 'La Problématique de la Biométhanisation en République Démocratique du Congo. Bulletin de l'ANSD, Vol. 3, pp. 7 - 34, 2002.
- MRA, 2007. Les statistiques du secteur de l'élevage au Burkina Faso.
- M'sadak Y., Ben M'barek A. et Baraket S. (2010), Suivis physico-chimique et énergétique de la biométhanisation expérimentale appliquée à la biomasse bovine
- Oost JFr., De Toffoli M. 2011. Estimation de la valeur fertilisante de digestats issus de la biométhanisation. Résultat de 3 années d'expérimentation en culture de maïs.
- PAVLOSTATHIS S. G. & GIRALDO-GOMEZ E., Kinetics of anaerobic treatment : a critical review, *Critical Reviews in Environmental Control*, 1991, vol. 21, pp. 411-490.
- Picot B., Paing J., Sambuco J.P., Costa R.H.R., Rambaud A., Biogas production, sludge accumulation and mass balance of carbon in anaerobic ponds, *Water Sci. Technol.* 48(2) (2003) 243–250.
- PNB-BF, 2009. Document de mise en œuvre du programme national des biodigesteurs du Burkina Faso. 66p.
- Pouech, P., Coudure, R. et 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.

Journée Recherche Porcine, vol. 37, p. 39-44

Pöyry, 2010. Rapport APD - Volet 2, ONEA, Ouagadougou.

RECORD, 2003. Méthanisation des déchets organiques : Etudes bibliographiques. 194p.

Roque, H. (1981). Fondements théoriques du traitement biologique des eaux. Chap. 3-6: Traitement anaérobie, 1476-1532.

Scriban, R. 1985. '*Biotechnologie*', 2ème Edit. Tech. & Doc. Lavoisier, Paris (France).

SNV, 2010. Cours sur le biogaz (anglais) [http://www.ppre.uni-oldenburg / download/Biogas/Biogas2011/Biogas_Course_Oldenburg_ReaderVers_2010__ohn_eTN.pdf](http://www.ppre.uni-oldenburg/download/Biogas/Biogas2011/Biogas_Course_Oldenburg_ReaderVers_2010__ohn_eTN.pdf).

SNV, SAEC, 2008. Etude du potentiel technique de marché de biodigesteurs domestiques dans des régions choisies au Burkina Faso.

Tou I., Igoud S. et Touzi A., 2001. Production de biométhane à Partir des Déjections Animales.

SOMMAIRE DES ANNEXES

Titre	Page
Annexe I : Caractérisation physico chimique et potentiel méthanogène	37
Annexe II : Illustration de la bactériologie et des digestats	43

ANNEXES

Annexe1 : Caractérisation physico chimique et potentiel méthanogène

Tableau 10: Potentiel de production de biogaz à partir des matières brutes

Origine des déchets	Production de bouse (Kg/jour)	Production spécifique de biogaz(Litre/kg)
Bouse de Vache (Bovins /Ovins)	10-25	35-40
Déjection de porcs	2-4	40-60
Fiente de volaille	0.02-0.03	55-70
Excreta Humain	0.18-0.34	40-50

Tableau 11: valeurs moyennes et extrêmes des paramètres physico-chimiques

Paramètres	source	Valeurs	Substrat porcin		Substrat bovin	
			Ponsontenga	Bassemyam II	Bassemyam I	Nioko
pH	Influent	Max	7,9	7,2	7,3	6,7
		Min	6,4	6	6,2	6,3
		Moy	7,0	6,4	6,8	6,5
	Effluent	Max	7,8	7,9	7,6	7,5
		Min	7	6,4	6	7,2
		Moy	7,6	7,5	7,1	7,3
DCO	Influent	Max	154800	133000	142400	128000
		Min	32400	32000	32800	27800

CARACTERISATION DU BIOGAZ PRODUIT A PARTIR DES SUBSTRATS BOVINS ET PORCINS

Promotion 2013

		Moy	66880	65160	60760	79520
	Effluent	Max	82400	82800	90400	100000
		Min	22000	22400	10000	13200
		Moy	40140	41760	36500	53000
MS (%)	Influent	Max	18,58	16,59	16,16	13,73
		Min	8,64	6,77	3,88	10,29
		Moy	12,94	11,68	10,52	11,88
	Effluent	Max	14,45	11,55	11,42	16,89
		Min	7,89	0,29	3,15	9,36
		Moy	10,54	5,15	6,65	11,47
MSV (%)	Influent	Max	93,63	92,86	91,4	89,46
		Min	66,67	78,86	70,37	81,97
		Moy	81,87	85,79	74,76	85,73
	Effluent	Max	77,9	82,14	74,47	83,33
		Min	51,43	63,73	27,27	72,61
		Moy	67,13	73,40	58,10	75,19

Tableau 12: Production de biogaz en fonction des MVS

Jours	Ponsontenga		Bassemyam II		Bassemyam I		Nioko	
	MVS kg	biogaz m ³						
1	4,88	2,44	5,707	2,853	4,553	1,821	1,946	0,779
2	4,41	2,21	6,194	3,097	4,354	1,742	0,712	0,285
3	2,80	1,40	4,462	2,231	3,793	1,517	2,532	1,013
4	4,16	2,08	1,660	0,830	2,567	1,027		
5	0,58	0,29	4,814	2,407	2,970	1,188		
6	0,64	0,32	1,428	0,714	2,376	0,950		
7	1,32	0,66	2,996	1,498	0,500	0,200		
8	1,10	0,55	0,167	0,084	0,399	0,160		
9	1,36	0,68	0,814	0,407	3,165	1,266	0,414	0,166
10	0,07	0,04	3,874	1,937	2,387	0,955	1,277	0,511
Moyenne	2,132	1,066	3,212	1,606	2,706	1,083	1,376	0,551

Tableau 13: Synthèse de la caractérisation du biogaz

Jours	Echantillon	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂
Jour 1	Pons	0,003	2,511	5,755	51,788	37,679
	Bass I	0,000	0,624	2,556	50,523	42,821
	Bass II	0,005	2,204	4,417	55,770	36,138
	Niok II	0,001	2,316	4,999	49,365	42,056
Jour2	Pons	0,003	3,362	7,984	52,814	36,473
	Bass I	0,006	2,478	4,796	51,580	41,401
	Bass II	0,005	1,913	2,758	58,889	36,495

CARACTERISATION DU BIOGAZ PRODUIT A PARTIR DES SUBSTRATS BOVINS ET PORCINS

Promotion 2013

	Niok II	0,000	1,947	1,929	53,915	41,614
Jour 3	Pons	0,003	2,103	3,821	54,315	38,506
	Bass I	0,003	3,099	7,627	48,725	39,175
	Bass II	0,009	2,336	4,869	54,823	36,439
	Niok II	0,002	4,447	13,185	45,249	35,139
Jour 4	Pons	0,004	4,688	14,233	47,602	31,885
	Bass I	0,003	3,350	9,298	46,289	38,715
	Bass II	0,002	1,174	0,834	60,234	35,525
	Niok II	0,000	14,230	50,521	13,846	15,610
Jour 5	Pons	0,004	1,722	3,471	54,833	37,386
	Bass I	0,002	2,451	6,448	46,668	41,587
	Bass II	0,002	2,353	5,991	53,640	36,221
	Niok II	0,001	1,817	4,122	47,880	43,705
Jour 6	Pons	0,003	2,841	6,804	52,844	37,508
	Bass 1	0,002	2,569	4,843	52,126	40,459
	Bass 2	0,001	3,192	6,886	57,905	32,016
Jour 7	Pons	0,004	3,231	7,477	55,643	33,645
	Bass 1	0,002	1,332	0,952	51,874	45,839
	Bass 2	0,001	2,209	3,373	60,742	33,674
	Niok	0,001	2,425	4,213	54,072	39,288
Jour 8	Pons	0,005	2,188	5,509	52,254	40,045
	Bass 1	0,002	1,736	3,704	49,091	45,467

CARACTERISATION DU BIOGAZ PRODUIT A PARTIR DES SUBSTRATS BOVINS ET PORCINS

Promotion 2013

	Bass 2	0,003	1,230	1,910	56,087	40,770
	Niok	0,003	2,229	4,391	54,768	38,608
Jour 9	Pons	0,008	4,960	15,374	49,267	30,392
	Bass 1	0,001	1,624	2,516	53,911	41,947
	Bass 2	0,000	3,290	6,132	57,987	32,591
	Niok	0,001	1,724	2,834	54,746	40,695
Jour 10	Pons	0,006	3,970	12,281	48,872	34,872
	Bass 1	0,004	2,698	7,668	48,943	40,686
	Bass 2	0,003	2,092	5,259	53,105	39,541
	Niok	0,001	3,198	9,546	47,699	39,556

Tableau 14: Composition moyenne des biogaz par site

Substrat	Site	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂	Nombre d'échantillon
Substrat Porcin	Pons	0,004	3,158	8,271	52,023	35,839	10
	Bass II	0,003	2,199	4,243	56,918	35,941	10
	porc	0,004	2,678	6,257	54,471	35,890	10
Substrat bovin	Bass I	0,003	2,196	5,041	49,973	41,810	10
	Niok II	0,001	3,815	10,638	46,838	37,364	10
	bœuf	0,002	3,005	7,839	48,405	39,587	10

Tableau 15: Données brutes sur la valeur agronomique

Essais	Sites	Pons		Bass 1		Bass 2		Niok II	
		Subst entrée	Digestat	Subst entrée	Digestat	Subst entrée	Digestat	Subst entrée	Digestat
Essai 1	PT	440	520	760	280	1160	920	360	480
	PO4	916	1048	1100	632	776	1000	560	560
	NH3	1192	1104	372	620	472	508	552	788
Essai 2	PT	200	200	640	120	320	240		
	PO4	836	880	708	284	740	384		
	NH3	932	992	308	308	760	332		
Essai 3	PT	400	800	1560	400	440	360		
	PO4	576	868	736	352	924	452		
	NH3	1076	1240	1376	1400	1200	992		

Tableau 16: Microbiologie de la méthanisation

Etapes	Types de transformation	Quelques microorganismes impliqués
1. Hydrolyse	Dépolymérisation en monomères : - polysaccharides---- oses (glucose, fructose...) - protéines---- acides aminés - lipides---- acides gras + glycérol	Bactéries hydrolytiques : <i>Salmonella typhii, Salmonella gallinarum, Escherichia coli, Acetobacter xylinum Klebsiella pneumoniae, etc</i>
	Fermentation des monomères en: - acides gras volatils (acides acétique, acide propionique,...)	Bactéries acidogènes : <i>Lactobacillus brevis, Lactobacillus fermenti, Leuconostoc mesenteroides,</i>

<p>2. Acidogénèse</p>	<p>- alcools (éthanol,...) - CO₂, H₂O</p>	<p><i>Leuconostoc pentosaceus</i>, <i>Clostridium tetani</i>, <i>Clostridium butyricum</i>, <i>Thermobacterium yoghurti</i>, etc</p>
<p>3. Acétogénèse</p>	<p>Fermentation des produits de l'acidogénèse (autre que l'acétate) en acétate, en H₂ et CO₂</p>	<p>Bactéries acétogènes : <i>Acetobacter xylinum</i>, <i>Salmonella typhosa</i>, <i>Salmonella pullorum</i>, <i>Mycoderma aceti</i></p>
<p>4. Méthanogénèse</p>	<p>Formation du méthane (CH₄) à partir de la réduction du CO₂ par H₂ du formate et du méthanol</p>	<p>Bactéries méthanogénèse: <i>Methanobacterium formicum</i>, <i>M. propionicum</i>, <i>Methanococcus mazei</i>, <i>M. venielli</i>, etc.</p>

Annexe 2 : Illustration de la bactériologie et des digestats



Figure 18: Boîtes de pétri ensemencées



Figure 19: Digestat en sortie du digesteur



Figure 20: Digestat déshydraté et desséché



Figure 21: Digestat en compostage



Figure 22: Digestat prêt pour l'amendement