



Adoption de la technologie du biodigesteur pour la production de biométhane dans la région de la Boucle du Mouhoun au Burkina Faso

Sidkieta Brice Ismaël OUEDRAOGO

Essai

Maîtrise en biologie végétale

Québec, Canada

© Sidkieta Brice Ismaël OUEDRAOGO, 2016

Résumé

Dans les pays industrialisés comme en voie de développement, on observe un besoin croissant en énergie. La production d'énergie à l'aide de ressources fossiles étant polluante et ces ressources n'étant pas illimitées, on s'oriente de plus en plus vers des sources d'énergie renouvelables. Parmi celles-ci, on trouve la biométhanisation. Les déchets alimentaires, agricoles et industriels constituent une véritable richesse exploitable pour la biométhanisation. La matière organique présente dans ces déchets peut être soumise à un processus de décomposition anaérobie pour donner du biogaz. Ce phénomène, découvert par Alessandro Volta en 1776, a été étudié et développé en tant que procédé d'ingénierie environnementale capable de donner une seconde vie aux déchets. Le biodigester est l'une des technologies conçues pour la biométhanisation des déchets organiques et la production de compost utile pour la fertilisation des sols agricoles. Le biogaz issu de biométhanisation peut servir à la production d'énergie. Le biodigester a été modernisé et adapté pour des besoins aussi bien industriels que domestiques. Comme outil domestique, il peut produire de façon autonome de l'énergie nécessaire à la consommation familiale. Ayant connu du succès en milieu rural dans les pays d'Asie, le biodigester est désormais adopté en Afrique. Le Burkina Faso est l'un des pays de l'Afrique bénéficiant de la technologie grâce à l'appui du programme néerlandais *African Biogas Partnership Programme* (ABPP). Présent depuis 2009, le biodigester a conquis toutes les régions du pays avec l'implantation de plus de 9540 unités à ce jour, un nombre encore modeste, mais non négligeable. La région de la Boucle du Mouhoun compte le plus grand nombre d'utilisateurs. Elle a donc constitué la zone d'étude du présent essai qui visait à identifier quelques facteurs d'adoption et de rejet de la technologie par de petits exploitants agricoles. Grâce à une revue bibliographique portant sur la biométhanisation et à des entrevues semi-structurées et des groupes de discussion auprès d'utilisateurs et de non-utilisateurs de la technologie, diverses contraintes à l'adoption de la technologie ont été identifiées. La difficulté d'approvisionnement en fumier et le manque de connaissances et d'équipement pour l'entretien du biodigester sont parmi les contraintes les plus importantes. La levée de ces contraintes pourrait permettre une amélioration du processus de biométhanisation et accélérer l'adoption des biodigesteurs en milieu rural au Burkina Faso.

Table des matières

| | |
|--|----|
| Résumé | i |
| Liste des tableaux | iv |
| Liste des figures..... | iv |
| REMERCIEMENTS | vi |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| Partie I | 3 |
| I. La biométhanisation et procédés de digestion anaérobie | 4 |
| 1. L’histoire de l’évolution de la digestion anaérobie | 4 |
| 2. Qu’est-ce que le biogaz ? | 5 |
| 3. Le processus de biométhanisation | 7 |
| 4. Les aspects biochimiques et microbiologiques des réactions de la fermentation anaérobie | 8 |
| 5. Les facteurs physico-chimiques influençant la méthanisation | 14 |
| II. Les technologies de biométhanisation existantes | 20 |
| 1. La classification des biodigesteurs | 20 |
| 2. Les grandes familles de procédés de méthanisation..... | 21 |
| 3. Les principaux biodigesteurs utilisés dans le monde..... | 28 |
| Partie II..... | 43 |
| I. Contexte social et économique du Burkina Faso..... | 44 |
| 1. Le cadre politique du secteur de l’énergie..... | 44 |
| 2. Le cadre législatif et règlementaire du secteur de l’énergie | 45 |
| II. La technologie des biodigesteurs au Burkina Faso | 48 |
| 1. La filière biogaz au Burkina Faso | 48 |
| 2. Le potentiel du biogaz | 48 |
| III. L’adoption et la vulgarisation des biodigesteurs dans la région de la Boucle du Mouhoun au Burkina Faso..... | 49 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | L'étude évaluative en milieu rural..... | 50 |
| 2. | La démarche méthodologique | 50 |
| IV. | Analyse et discussion des résultats de l'enquête | 56 |
| 1. | La perception des biodigesteurs par les bénéficiaires et la population..... | 56 |
| 2. | Les besoins de la famille | 56 |
| 3. | Les motifs d'installation du biodigesteur | 57 |
| 4. | La fonctionnalité des biodigesteurs dans la région de la Boucle du Mouhoun | 59 |
| 5. | Le niveau de satisfaction des utilisateurs du biodigesteur..... | 60 |
| V. | Contributions et impacts socio-économiques et environnementaux | 62 |
| 1. | L'apport socio-économique..... | 62 |
| 2. | L'évaluation des impacts environnementaux | 63 |
| VI. | Analyse et diagnostic des problèmes rencontrés dans l'utilisation des biodigesteurs ... | 65 |
| 1. | Les bonnes pratiques et méthodes d'utilisation des biodigesteurs | 65 |
| 2. | Les difficultés d'utilisation du biodigesteur et les problèmes rencontrés par les bénéficiaires..... | 66 |
| VII. | Recommandations et propositions d'amélioration souhaitées par les producteurs et bénéficiaires du biodigesteur..... | 73 |
| VIII. | Piste d'amélioration de la production de biogaz par le biodigesteur..... | 75 |
| 1. | Optimisation du procédé de méthanisation par pré-traitement de la biomasse | 75 |
| 2. | Production de biogaz à partir de biomasses alternatives | 76 |
| 3. | Préparation du dispositif expérimental de production de biogaz..... | 82 |
| 4. | Résultats et discussion..... | 83 |
| | CONCLUSION | 87 |
| | Références | 88 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Composition générale du biogaz (Karki et al., 2015)..... | 6 |
| Tableau 2: Échantillon de l'étude..... | 54 |
| Tableau 3: Motifs invoqués par les bénéficiaires du biodigesteur pour expliquer pourquoi ils ont adopté la technologie..... | 59 |
| Tableau 4: Difficultés et problèmes liés à l'utilisation du biodigesteur mentionnés par les bénéficiaires..... | 72 |
| Tableau 5: Teneur en humidité et en matière sèche de la jacinthe d'eau | 78 |
| Tableau 6: Teneur en cendre et en matière volatile de la jacinthe d'eau..... | 79 |
| Tableau 7: Teneur en humidité et en matière sèche des résidus de noix de karité | 80 |
| Tableau 8: Teneur en cendre et en matière volatile des résidus de noix de karité..... | 81 |
| Tableau 9: Teneur en humidité et en matière sèche de la bouse de vache | 81 |
| Tableau 10: Teneur en cendre et en matière volatile de la bouse de vache..... | 82 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1: Schéma des différentes étapes de la méthanisation et des souches microbiennes impliquées (Mangel, 2008)..... | 9 |
| Figure 2: Réacteurs à cellules libres agités avec recyclage de biomasse (Bernet & Buffière, 2008) | 22 |
| Figure 3: Réacteur à lit de boues (Moletta, 2011c) (A : Alimentation, G : Biogaz, S : Sortie de l'effluent)..... | 23 |
| Figure 4: Réacteur à compartiments (Moletta, 2011c) (A : Alimentation, G : Biogaz, S : Sortie de l'effluent)..... | 23 |
| Figure 5: Réacteur à bassin (Moletta, 2011c) (A : Alimentation, G : Biogaz, S : Sortie de l'effluent) | 24 |
| Figure 6: Réacteur UASB (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>) (Marchaim, 1994)..... | 26 |
| Figure 7: Réacteur à filtre anaérobie (La Farge, 1995) | 27 |
| Figure 8: Réacteur à circulation interne (Moletta, 2011c) (A : Alimentation, G : Biogaz, S : Sortie de l'effluent)..... | 27 |
| Figure 9: Digesteur Kompogas (Kompogas, 2007)..... | 29 |
| Figure 10: Digesteur Valorga (Valorga, 2016)..... | 30 |
| Figure 11: Digesteur DRANCO (OWS, 2016)..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Figure 12: Digesteur Lipp (Lipp, 2016) | 32 |
| Figure 13: Digesteur à dôme fixe | 34 |
| Figure 14: Digesteur à dôme flottant..... | 35 |
| Figure 15: Digesteur à bâche souple | 36 |
| Figure 16: Digesteur rwandais de type chinois (Rwigema, 2015) | 38 |
| Figure 17: Fiberglass biodigester (Rwigema, 2015) | 39 |
| Figure 18: Flex bag biodigester (Rwigema, 2015)..... | 39 |
| Figure 19: Digesteur kenyan à dôme flottant en plastique (Karki et al., 2015)..... | 40 |
| Figure 20: Digesteur à bâche de SOGAS Dakar (Office national de l'assainissement du Sénégal, 2013)..... | 42 |
| Figure 21: Carte géographique de la Boucle du Mouhoun – Burkina Faso (Institut Géographique du Burkina, 2016)..... | 51 |
| Figure 22: Taux de fonctionnalité des biodigesteurs installés via le projet PRCVM (n = 87)..... | 60 |
| Figure 23: Niveau de satisfaction des répondants (n = 87) sur l'utilisation du biodigester | 61 |
| Figure 24: Groupe de femmes du village de Bomborokuy | 62 |
| Figure 25: Biodigester modèle GGC 2047 du PNB (photo : SIDWAYA 2015)..... | 65 |
| Figure 26: Niveau de scolarité des bénéficiaires interrogés individuellement (n = 57) | 67 |
| Figure 27: Élevage transhumant..... | 68 |
| Figure 28: Personnes responsables de l'entretien du biodigester dans le ménage (n = 57)..... | 69 |
| Figure 29: Équipement utilisé pour le transport du fumier (n = 57)..... | 70 |
| Figure 30: Distribution des tâches afférentes à l'entretien du biodigester (n = 57)..... | 71 |
| Figure 31: Production de biogaz par digestion anaérobie en bar/jour à partir de bouse de vache, de jacinthe d'eau et de bouse de vache + résidus de noix de karité. | 84 |

REMERCIEMENTS

Je souhaite avant tout remercier mon directeur d'essai, Monsieur Alain OLIVIER, pour son intérêt contagieux à l'implication internationale et son accompagnement dans la réalisation de cet essai. Sa sympathie, son enseignement et ses encouragements m'ont grandement motivé dans mon parcours scolaire. J'ai découvert, aimé et amélioré mes connaissances et compétences dans le domaine des sciences agricoles et forestières.

Je tiens également à remercier la Chaire en développement international ainsi que tout son personnel, qui ont apporté leur soutien sur le plan académique et financier dans l'accomplissement de ce travail.

Une partie de ces travaux n'aurait pu être réalisée sans l'aide de la Chaire en développement international, du Bureau International de l'Université Laval, de la Fondation Œuvre Léger, de l'UGCPA et de l'IRSAT.

J'aimerais également remercier ma copine pour avoir fait preuve de patience et de soutien dans la réalisation de cette maîtrise dans son ensemble.

Finalement, mais non moins important, je dois dire un merci profond à tous mes professeurs, collègues de classe, amis et membres de ma famille pour leur disponibilité et leur encouragement durant ce parcours à la maîtrise.

INTRODUCTION

La demande énergétique mondiale qui ne cesse de croître entraîne une surexploitation des ressources naturelles et d'importants déséquilibres dans les écosystèmes terrestres, ainsi que des changements climatiques. Conscientes de l'étendue du problème, diverses tribunes internationales lancent des signaux d'alerte afin d'interpeler l'opinion publique et de préparer la population mondiale aux changements nécessaires. C'est ainsi que progressivement, se mettent en place des politiques de préservation de l'environnement. De nouvelles disciplines telles que le développement durable et les énergies renouvelables cherchent ainsi de nouvelles approches biologiques et écologiques pour valoriser les biomasses à des fins énergétiques.

La biométhanisation constitue une approche intéressante pour la valorisation de la biomasse tout en préservant l'environnement. Elle peut se définir comme étant un procédé naturel de dégradation de la matière organique par un écosystème microbien en l'absence d'oxygène. Ce procédé produit du méthane (biogaz), du gaz carbonique et des amendements organiques tout en participant à la protection de l'environnement grâce au traitement des effluents ou des déchets organiques (La Farge, 1995). La biométhanisation présente donc des avantages dans divers domaines. Au cours des vingt dernières années, de nombreuses études ont permis de mieux comprendre et maîtriser le mécanisme de méthanisation de la biomasse. À présent, la biométhanisation constitue une filière émergente et reconnue dans le secteur des énergies renouvelables. Elle est largement répandue dans le monde. Elle est notamment utilisée dans les unités de traitement des déchets municipaux et agricoles dans les pays développés. Par exemple, au Québec, la biométhanisation vise particulièrement le secteur agricole.

Le procédé de biométhanisation du lisier de porcs est apparu comme une solution particulièrement prometteuse parce qu'il permettait à la fois de réduire la charge organique du lisier, d'en atténuer les odeurs lors de l'entreposage et de l'épandage, de détruire une grande partie des agents pathogènes, d'améliorer la biodisponibilité des éléments fertilisants du lisier et de faciliter l'exportation des surplus. Par ailleurs, le traitement du lisier par méthanisation allait permettre de produire un gaz, le méthane, qui pourrait être valorisé à la ferme, permettant ainsi de réduire le coût net du traitement (Brodeur, Crowley, Desmeules, Pigeon, & St-Arnaud, 2008).

Au fil des dernières décennies, la technique de biométhanisation s'est considérablement développée tant sous l'aspect biochimique que technologique. Les considérations d'ordre environnemental et les besoins en énergie renouvelable ont suscité son appréciation et soulevé un intérêt du côté des pays industrialisés, mais aussi des pays en voie de développement (Marchaim, 1994). Pour ces

raisons, la filière « biogaz » bénéficie de soutiens financiers considérables. Diverses technologies de méthanisation ont donc été conçues pour s'adapter à la demande.

L'objectif de cet essai est de dresser un état complet des connaissances théoriques et pratiques sur les potentialités de la biométhanisation. Dans la première partie de l'essai, les principes de base de la biométhanisation seront présentés. Un retour à la période de découverte de la fermentation anaérobie permettra de comprendre et de suivre l'évolution de la filière « biogaz ».

Ensuite, les aspects biochimiques et les conditions fondamentales de la biométhanisation seront étudiés. Une description détaillée des mécanismes de dégradation des matières organiques lors du processus de fermentation anaérobie sera effectuée.

Un certain nombre de procédés sont utilisés pour effectuer la digestion anaérobie et différents modèles de réacteurs sont conçus à cet effet. Une liste des technologies de valorisation des résidus organiques les plus répandues va donc être dressée afin de permettre leur comparaison, dans la dernière section de la première partie.

La seconde partie de l'essai consistera en l'analyse des facteurs d'adoption de la technologie de biométhanisation au Burkina Faso. Dans le désir de renforcer la capacité énergétique et le développement rural du pays, le Burkina Faso a lancé, comme d'autres pays du Sud, un Programme national de biogaz. Celui-ci offre des particularités intéressantes en matière d'adoption du biogaz comme source d'énergie. Pour comprendre l'apport de ce programme, une étude terrain a été réalisée dans la région de la Boucle du Mouhoun. Elle avait pour objectif d'évaluer le niveau de pénétration de la technologie et son impact dans la vie de la communauté locale. L'essai se termine sur la présentation des données recueillies lors de la réalisation de tests de production de biogaz en laboratoire. Des idées afin d'optimiser l'utilisation de la technologie au Burkina Faso sont finalement proposées.

Partie I

Principe de base et développement de la filière « biogaz »

I. La biométhanisation et procédés de digestion anaérobie

1. L'histoire de l'évolution de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie ou méthanisation est un procédé de transformation de la matière organique en un produit composé principalement de méthane et de gaz carbonique appelé biogaz. Ce procédé repose sur différentes interactions complexes faisant appel à des connaissances microbiologiques, biochimiques et environnementales.

L'origine de la biométhanisation reste encore mal élucidée. La littérature indique que Plinius fut la première personne à mentionner l'apparition d'étranges lumières scintillantes à la surface des eaux marécageuses (Marchaim, 1994; Van Brakel, 1908). Une explication mythique fut d'abord donnée à ce phénomène. C'est en 1630 que Van Helmont lui apporte une explication scientifique. Il parvient en effet à développer des gaz inflammables à partir de dépôts de matière organique putréfiée. Ce n'est cependant qu'en 1776 que Alessandro Volta parvient à collecter du gaz provenant du Lac Como pour approfondir ces observations. Il arrive à établir que le gaz émis des marais est issu d'un procédé de fermentation et que dans une certaine proportion, le gaz a des propriétés inflammables et explosives avec l'air (Deublein & Steinhauser, 2008; Marchaim, 1994; Moletta & Verstraete, 2011). Lavoisier démontre ensuite que le gaz inflammable de Volta était du « gas hidrogenium carbonatrum » (Moletta & Verstraete, 2011). Dans les années 1800 (Deublein & Steinhauser, 2008), Cruikshank établit que le méthane ne contient pas d'oxygène (1801) et entre 1804 et 1810, Dalton, Henry et Davy découvrirent la composition chimique du méthane et établirent que le gaz de charbon était très peu différent du gaz des marais cité par Volta. Ils montrèrent aussi que le méthane était produit à partir des résidus d'animaux en décomposition (Marchaim, 1994). Ce n'est qu'en 1821 que Avogadro propose la formule chimique du méthane (CH_4) qui sera adoptée en 1865 ((Deublein & Steinhauser, 2008; Moletta & Verstraete, 2011).

Dans la seconde moitié du 19^e siècle, beaucoup de recherches ont été réalisées en France afin de mieux comprendre le processus de fermentation anaérobie. Les recherches ont permis de détecter et d'identifier les microorganismes essentiels à la fermentation. Béchamp établit en 1868 que la conversion de l'éthanol en méthane durant la fermentation requiert la combinaison d'une population mixte de microorganismes. De plus, il démontre que les produits de la fermentation dépendent du type de substrat (Deublein & Steinhauser, 2008). En 1884, Gayon et Louis Pasteur parviennent à produire 100 L de méthane à partir de la fermentation de 1 m³ de fumier de cheval à 35 °C. Pasteur conclut que la production de biogaz pourrait être une source de chauffage et d'éclairage. Ainsi il établit que le biogaz pourrait servir à l'éclairage des rues de Paris. C'est à partir

de ce moment que l'on commence à parler de production d'énergie à partir des ressources renouvelables (Deublein & Steinhäuser, 2008; Marchaim, 1994). Le concept d'éclairage des rues au biogaz démarre dès 1896 avec l'Angleterre, puis l'Inde en 1897 (Marchaim, 1994; Van Brakel, 1908). Les Pays-Bas en 1899 essaient la formule d'éclairage, chauffage et cuisson au biogaz dans environ 60 fermes (Van Brakel, 1908). La France est alors reconnue pour avoir apporté une des premières contributions significatives dans le domaine du traitement anaérobie de matières solides en suspension dans un liquide (Marchaim, 1994).

L'intérêt grandissant pour le biogaz a conduit Travis (1904) à optimiser le procédé en mettant en œuvre une nouvelle façon de faire en deux étapes où les matières en suspension étaient séparées de l'effluent et envoyées dans une chambre spécifique pour l'hydrolyse. Et en 1920, Boswell a entrepris des études sur la digestion anaérobie dans lesquelles il identifie certaines propriétés telles que le devenir de l'azote, les caractéristiques stœchiométriques de la réaction et l'utilisation du procédé pour les déchets industriels (Marchaim, 1994). Les années qui suivirent la Première et la Seconde Guerre Mondiale ont vu se développer la recherche et l'utilisation de la digestion anaérobie dans les procédés de traitement des déchets et eaux usées.

2. Qu'est-ce que le biogaz ?

Le biogaz est un gaz combustible produit à partir d'un procédé biologique en absence d'air (anaérobie). Il est constitué en général de méthane (CH_4), de dioxyde de carbone (CO_2), de vapeur d'eau (H_2O), d'azote (N_2), de sulfure d'hydrogène (H_2S), d'hydrogène (H_2) et d'éléments traces (Deublein & Steinhäuser, 2008; Karki, Nakarmi, Dhital, & Sharma, 2015). Les proportions en éléments sont décrites dans le tableau 1 à titre d'exemple. Sachant que la variabilité et la diversité des composés produits dans le biogaz sont en fonction du substrat décomposé, il s'avère en effet délicat de donner une composition type du biogaz.

Tableau 1: Composition générale du biogaz (Karki et al., 2015)

| Substances | Symbole | Pourcentage (%) |
|---------------------|------------------|-----------------|
| Méthane | CH ₄ | 50 - 70 |
| Dioxyde de carbone | CO ₂ | 30 – 40 |
| Hydrogène | H ₂ | 5 – 10 |
| Azote | N ₂ | 1 – 2 |
| Eau | H ₂ O | 0,3 |
| Sulfure d'hydrogène | H ₂ S | Traces |

Les caractéristiques des principaux composés

- Le méthane (CH₄)

Le taux de CH₄ confère au biogaz son pouvoir calorifique. Il constitue l'un des principaux composés participant au dégagement d'énergie lors de la combustion. Il est inodore et incolore. Son auto-inflammation n'est pas spontanée. Il nécessite la présence de flamme ou d'étincelle.

- Le dioxyde de carbone (CO₂)

La production de biogaz associe naturellement la présence de CO₂ suite à l'activité microbienne. Le CO₂ est inhérent au biogaz, mais ne participe pas à son processus de combustion.

- L'hydrogène (H₂)

L'hydrogène contribue à la réduction significative de l'indice méthane. Il est formé durant la phase de l'acétogénèse. En grande quantité, il peut être considéré comme un inhibiteur de la méthanogénèse. L'hydrogène est un combustible dont la vitesse de propagation de flamme est extrêmement élevée : 260 cm/s (RECORD & Couturier, 2009).

- Les composés azotés

Le diazote (N₂), contenu dans le biogaz, est susceptible de former de l'ammoniac (NH₃) par hydrogénation avec le dihydrogène (H₂) aussi présent dans le biogaz. La présence du NH₃ dans le biogaz peut contribuer à accélérer et amplifier la combustion, ce qui occasionne des contraintes thermiques et de la corrosion. Elle peut également être source d'inhibition du processus de méthanisation. La solution souvent apportée est le contrôle strict du pH du milieu dans le digesteur (RECORD & Couturier, 2009).

- L'eau (H₂O)

À la sortie, le biogaz est saturé de vapeur d'eau et la quantité d'eau augmente avec la température du gaz. En forte présence, l'eau peut réagir avec le H₂S et former de l'acide sulfureux qui est un composé considéré corrosif (RECORD & Couturier, 2009).

- Les composés soufrés

Le biogaz contient toujours de l'H₂S dont la proportion peut atteindre en fonction du substrat les valeurs de 20 000 ppm. La présence de H₂S dans le biogaz est considérée nuisible. Il peut occasionner de nombreux problèmes tels que la corrosion des conduites, des installations et la pollution environnementale (pluies acides, odeur).

Les solutions recommandées seraient de désulfurer le gaz soit par voie biologique ou par réaction avec l'hydroxyde de fer, ou encore par filtration sur du charbon actif. On conseille aussi d'agiter continuellement le substrat dans le digesteur et de disposer les conduites de gaz en série entre le digesteur et le local de post-digestion (RECORD & Couturier, 2009).

3. Le processus de biométhanisation

La biométhanisation est un processus biologique qui dégrade la matière organique ou minérale en un gaz appelé « biogaz ». La transformation implique une communauté de bactéries dites méthanogènes fonctionnant en absence d'oxygène. On parle alors de digestion anaérobie, c'est-à-dire en absence d'oxygène. Le taux de méthane contenu dans le biogaz est fonction de la composition de la matière dégradée et des conditions de la fermentation (Amarante, 2010; Moletta, 2002b).

Cette transformation est complexe, car elle fait appel à un certain nombre de réactions biochimiques réalisées par un consortium de bactéries et d'*Archaea*, ou archéobactéries. Elle est parfois longue étant donné que la biodégradabilité des substrats organiques varie en fonction des caractéristiques de la matière (Moletta, 2011a). Par exemple, les substrats d'origine solide tels que les déchets agricoles, le papier et les déchets de pâte à papier nécessitent plus de temps pour leur hydrolyse. Le processus passe d'une forme solide à une forme soluble (sucre, lipide, protéine) pour être utilisé par les bactéries. En comparaison avec les matières organiques facilement disponibles, telles que les déchets alimentaires, le glucose prend moins de temps à se dégrader et est donc facilement métabolisable par les microorganismes (Dhamodharan Kondusamy & Ajay S Kalamdhad, 2014).

4. Les aspects biochimiques et microbiologiques des réactions de la fermentation anaérobie

Les réactions enzymatiques opérées lors de la digestion anaérobie ont pour but de décomposer la matière organique en métabolites facilement transformables en méthane et en dioxyde de carbone (Marchaim, 1994; Moletta, 2011a). Elles reposent sur l'action de différentes populations de microorganismes demeurant en équilibre dynamique et synergique (Marchaim, 1994). Les populations microbiennes se révèlent être sensibles aux perturbations, en particulier à l'oxygène et aux métaux lourds ou encore aux surcharges organiques (Cresson, 2006). Le procédé de digestion anaérobie peut se montrer souvent instable. Un changement des conditions du milieu des microorganismes peut affecter l'équilibre et introduire des substrats intermédiaires indésirables.

Selon Cresson (2006), Godon et al. (1997) auraient identifié près de 140 espèces de microorganismes différents sur un inventaire de 579 individus pris dans un digesteur qui participeraient à la digestion anaérobie. Ces populations mixtes de microorganismes sont majoritairement organisées sous la forme de biofilms ou d'agrégats granulaires (Cresson, 2006). Le modèle décrit dans la figure 1 présente le processus de méthanisation partant de la matière organique à la production de biogaz (Mangel, 2008). Il comprend quatre phases, accomplies par différents groupes de microorganismes. Chaque étape de la digestion conduit à la formation de composés intermédiaires, qui deviendront des intrants pour les prochaines étapes, jusqu'à la formation du biogaz et du digestat.

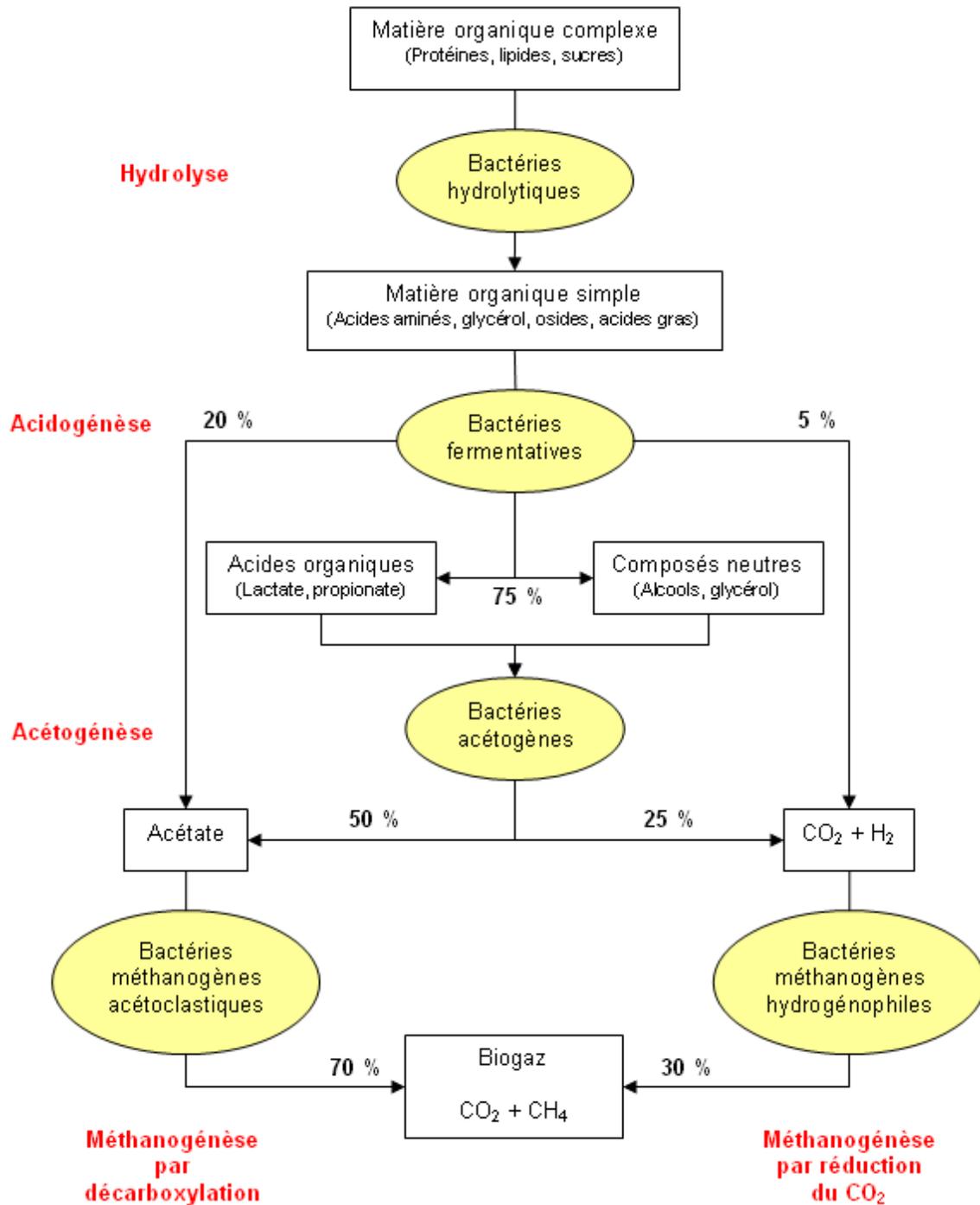
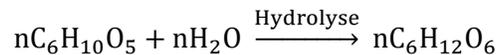


Figure 1: Schéma des différentes étapes de la méthanisation et des souches microbiennes impliquées (Mangel, 2008)

a. L'hydrolyse

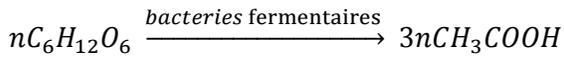
Au cours de la phase d'hydrolyse, les polymères organiques de haut poids moléculaire sont solubilisés en monomères. En d'autres termes, les molécules organiques complexes telles que les polysaccharides, les protéines, les lipides et les celluloses sont réduites en des substances plus simples solubles dans l'eau (monosaccharides, acides gras, acides aminés) et assimilables par les bactéries de l'acidogénèse. Dans cette étape, le procédé d'hydrolyse ou de solubilisation est effectué par des exoenzymes (hydrolases) des microorganismes. Ces microorganismes impliqués sont en général des bactéries (et parfois même des champignons) à métabolisme de type anaérobie strict ou facultatif (Deublein & Steinhauser, 2008; Dhamodharan Kondusamy & Ajay S Kalamdhad, 2014). L'hydrolyse des particules (et de la matière solide en général) est une étape généralement lente et limitante (Godon, 2008; Moletta, 2002a). Selon Deublein and Steinhauser (2008, p. 94) la lignocellulose et la lignine sont des composés qui se dégradent plus lentement comparativement aux glucides (qui s'hydrolysent en quelques heures) et aux protéines et lipides (qui s'hydrolysent en quelques jours).



b. L'acidogénèse

L'acidogénèse correspond à la phase où les monomères issus de l'hydrolyse sont transformés par les bactéries fermentaires en acides gras volatils (AGV) (les acides acétiques, propanoïques et butyriques), alcools (éthanol), sulfure de dihydrogène (H_2S), acide organique à courte chaîne carbonée (1 à 5 carbones) et des gaz tels que CO_2 , H_2 ainsi que de l'azote ammoniacal (sous forme NH_4^+ ou NH_3) (Buffiere, Carrere, Lemaire, & Vasquez, 2007; Dhamodharan Kondusamy & Ajay S Kalamdhad, 2014; Moletta, 2011a). L'acidogénèse implique un groupe très diversifié de bactéries. Elles peuvent être anaérobies strictes ou facultatives avec un temps de duplication très court (de 30 minutes à quelques heures). Mais la plupart sont strictement anaérobies. Par exemple, le genre *Clostridium* constitue souvent la fraction la plus importante de la population anaérobie participant à cette étape, bien que d'autres groupes bactériens comme la famille des *Enterobacteriaceae* ou encore les genres *Bacteroides*, *Bacillus*, *Pelobacter*, *Acetobacterium* et *Ulyobacter* soient souvent impliqués (Cresson, 2006). Comme son nom le suggère, la phase d'acidogénèse se traduit souvent par une acidification du milieu. Elle est généralement rapide en raison du fort taux de croissance des bactéries mises en jeu. En cas de surcharge organique, les bactéries acidogènes sont capables de métaboliser des composées intermédiaires comme l'hydrogène et l'acétate. Ces métabolites ont une action négative puisqu'ils peuvent causer la baisse du pH du milieu. Cela peut occasionner une action inhibitrice sur les microorganismes acétogènes

et méthanogènes et même un arrêt de la digestion anaérobie (Cresson, 2006; Dhamodharan Kondusamy & Ajay S. Kalamdhad, 2014).



c. L'acétogénèse

La phase de l'acétogénèse permet la transformation des intermédiaires métaboliques issus de la phase précédente en précurseurs directs du méthane : l'acétate (CH_3COO^-), le dioxyde de carbone (CO_2) et l'hydrogène (H_2). On distingue trois groupes de bactéries acétogènes (Moletta, 2002a) impliquées dans cette étape.

▪ Les bactéries productrices obligées d'hydrogène

Les bactéries productrices obligées d'hydrogène, encore appelées OHPA « Obligate Hydrogen Producing Acetogens », sont des bactéries anaérobies strictes dites syntrophiques. Les OHPA sont capables de produire de l'acétate et de l' H_2 à partir des métabolites réduits issus de l'acidogénèse tels que le propionate et le butyrate. Elles font partie des genres *Syntrophospora*, *Syntrophobacter*, *Syntrophomonas*, *Syntrophus*, *Syntrophococcus*, etc. Il faut noter que ces bactéries ont un temps de dédoublement assez long, de l'ordre de 1 à 7,5 jours (Cresson, 2006; Mangel, 2008). Elles ont pour caractéristique de catalyser des réactions thermodynamiques défavorables (variation d'énergie libre standard positive $\Delta G^0 > 0$) dans les conditions standards (concentration des réactifs = 1M ; pression des gaz = 1 atm.) (Cresson, 2006; Godon, 2008). Par conséquent, les réactions ne deviendront possibles que lorsque les pressions partielles d' H_2 seront très faibles, de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6} atm. Autrement, l'accumulation d'hydrogène entraîne un arrêt de l'acétogénèse. Afin que les réactions se réalisent dans les conditions naturelles, elles nécessitent une seconde bactérie qui puisse éliminer une des molécules produites, permettant de transformer la réaction endergonique en réaction exergonique pouvant ainsi générer de l'énergie nécessaire pour l'activité microbienne (Moletta, 2002a). Cette élimination peut être réalisée grâce à l'association syntrophique de ces bactéries avec des microorganismes hydrogénéotrophes, idéalement les *Archaea* méthanogènes, qui vont consommer l'hydrogène produit (Cresson, 2006).

▪ Les bactéries homoacétogènes

Les bactéries homoacétogènes sont divisées en deux groupes suivant l'origine de l'acétate (Moletta, 2002a).

- Soit l'acétate provient d'un substrat carboné ; il s'agit des bactéries dites du groupe 1 :
Fermentation du substrat → acétate
Les genres de bactéries correspondants sont : *Butyribacterim*, *Peptococcus*.
- Soit l'acétate provient de la réduction du CO₂ par H₂. Il s'agit là du groupe 2 :
H₂ + CO₂ ou H⁺ (réduction d'un composé carboné) + CO₂ → acétate
Les genres de bactéries correspondants sont : *Acetoanaerobium*, *Acetobacterium*,
Clostridium, *Sporomusa*, etc.

Ces organismes ont une production exclusive d'acétate. Elles ne semblent pas entrer en compétition pour l'hydrogène avec les *Archaea* méthanogènes hydrogénotrophes (Cresson, 2006), mais elles contribuent à la régulation de l'hydrogène dans le milieu, notamment en utilisant l'hydrogène des bactéries OHPA (Buffiere et al., 2007).

- Les bactéries sulfatoréductrices

Les bactéries sulfatoréductrices utilisent comme accepteurs finaux d'électrons le sulfate (SO₄²⁻), le sulfite (SO₃²⁻), et le thiosulfate (S₂O₃²⁻) qu'elles réduisent en sulfure (S²⁻). Ces bactéries sont des dégradeurs finaux de la matière organique tout comme les méthanogènes. Toutefois, leur métabolisme conduit à la formation de H₂S, ce qui a un impact négatif sur les bactéries méthanogènes par inhibition directe ou par précipitation directe des éléments nécessaires à leur croissance (Buffiere et al., 2007). Comme on le remarque, elles peuvent également avoir une fonction régulatrice d'hydrogène. D'un point de vue métabolique, on peut les séparer en 2 groupes :

- Le groupe des bactéries qui utilisent le lactate comme source de carbone et l'oxydant de manière incomplète en acétate et CO₂. Elles sont aussi capables d'utiliser autres substrats, les produits de l'étape précédente tels que le fumarate, le malate, le pyruvate... Les genres de bactéries retrouvés dans ce groupe sont : *Desulfobrio*, *Desulfomaculum*, *Desulfohalobium*, *Thermodesulfobacterium*...
- Le groupe des bactéries qui oxydent de manière complète jusqu'au CO₂ l'acétate, des acides gras à longues chaînes, certains composés aromatiques et des substrats communs aux bactéries du premier groupe. Les genres des bactéries retrouvés dans ce groupe sont : *Desulfobacter*, *Desulfobacterium*, *Desulfotomaculum*, *Archaeoglobus*...

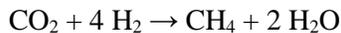
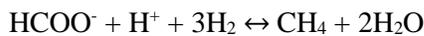
Dans la digestion anaérobie, c'est l'hydrogène qui est la molécule clé. Elle est produite par les bactéries syntrophes et consommée par des bactéries homoacétogènes, méthanogènes hydrogénophiles et sulfatoréductrices, principalement (Moletta, 2002a).

d. La méthanogénèse

La méthanogénèse est la dernière étape de minéralisation des produits de l'acétogénèse en méthane. Elle est l'étape la plus sensible du processus. Les bactéries méthanogènes impliquées sont des microorganismes qui fonctionnent dans des conditions de milieu anaérobie très strictes, notamment avec des potentiels d'oxydo-réduction très bas (Moletta, 2002a). Ces microorganismes appartiennent au domaine des *Archaea* et utilisent essentiellement comme substrat l'acétate, le formate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène issus des étapes précédentes pour produire du méthane. Deux grandes catégories d'*Archaea* méthanogènes sont identifiées dans cette étape :

- Les méthanogènes hydrogénophiles ou hydrogénotrophes

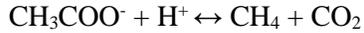
Ils produisent le méthane en réduisant le dioxyde de carbone ou l'acide formique par l'hydrogène selon les réactions suivantes :



Tel que mentionné précédemment, les *Archaea* méthanogènes hydrogénophiles vivent en association syntrophique avec les bactéries fermentaires qui leur procurent en continu le dioxyde de carbone et l'hydrogène. Leur rôle s'avère notable dans le maintien d'une faible pression en hydrogène, aidant ainsi la croissance des bactéries acétogènes. Pour permettre la formation de méthane, la pression partielle en hydrogène ne doit toutefois pas être inférieure à 10^{-6} atm. (Cresson, 2006). Les genres méthanogènes les plus couramment représentés sont les *Methanobacterium*, *Methanothermobacter*, *Methanobrevibacter*... (Dhamodharan Kondusamy & Ajay S Kalamdhad, 2014). On estime généralement de 27 à 30 % la proportion de méthane issue de cette voie de production (Deublein & Steinhauser, 2008). Il faut noter que les méthanogènes hydrogénophiles ont un temps de doublement très rapide, de l'ordre de quelques heures (Moletta, 2002b).

- Les méthanogènes acétoclastes (ou acétotrophes)

Ils génèrent le méthane à partir d'acide acétique, de méthanol et de méthylamine. Les *Methanosarcina* et *Methanosæta* sont les deux genres les plus fréquemment rencontrés. Il faut remarquer que les *Methanosæta* ont pour unique substrat l'acétate pour produire le méthane (Cresson, 2006). La réaction s'écrit comme suit :



Les *Archaea* du genre *Methanosarcina* présentent un plus large spectre de substrats. Elles sont capables de consommer l'acétate, le dioxyde de carbone, l'hydrogène, le méthanol et les méthylamines pour former le méthane (Cresson, 2006). Les bactéries acétoclastes sont réputées avoir des vitesses de réaction lentes. Leurs temps de doublement de croissance avoisinent 0,5 à plusieurs jours. Malgré cette lenteur, la majeure partie de la production de méthane passe principalement par elles. On évalue généralement qu'environ 70 % du méthane est issu de cette voie (Moletta, 2002a).

5. Les facteurs physico-chimiques influençant la méthanisation

Le processus de digestion anaérobie fait intervenir différents facteurs physico-chimiques qui influencent les réactions biologiques. Comme tout procédé biologique, la communauté bactérienne qui constitue le consortium méthanogène requiert des conditions particulières pour assurer une bonne activité. L'étude des procédés biologiques de méthanisation permet de différencier un certain nombre de paramètres majeurs de la digestion anaérobie à respecter. Ces paramètres sont entre autres le pH, la température, la concentration en éléments nutritifs et en inhibiteurs et le temps de séjour du digestat. Pour garantir une bonne méthanisation durant la fermentation anaérobie, il est donc important de contrôler les différents facteurs mentionnés.

a. Le pH

Le pH est un des paramètres les plus importants dans le processus de méthanisation. En effet, le sort de vie de la population microbienne impliquée de l'hydrolyse jusqu'à la méthanisation dépend du pH du milieu. Les bactéries méthanogènes responsables de la production du méthane sont très sensibles à la variation du pH. Contrôler sa stabilité durant la fermentation est donc fondamental. Un changement important de pH peut causer l'arrêt de la chaîne des réactions au cours de la digestion (Marchaim, 1994). Deublein and Steinhauser (2008) et RECORD and Couturier (2009) situent le pH optimal de la méthanisation entre 6,7 et 7,5. Buffière et al. (2007) le situent pour leur part entre 6,8 et 7,4 alors que Bernet and Buffière (2008) et House (2006) estiment que le pH optimal pour la formation de méthane est compris entre 6,8 et 8,5. Toutes ces différences de pH avancées par les auteurs peuvent se comprendre par plusieurs raisons. D'abord, toutes les bactéries présentes dans le processus de méthanisation n'ont pas la même tolérance au pH. Par exemple, les bactéries du genre *Methanosarcina* peuvent survivre à un pH = 6,5 alors que d'autres bactéries méthanogènes verront leur activité s'interrompre à pH < 6,7 (Deublein & Steinhauser, 2008). Aussi, il faut ajouter que les bactéries de l'acidogénèse peuvent tolérer des pH assez bas comparativement

aux bactéries méthanogènes (House, 2006). Dhamodharan Kondusamy and Ajay S Kalamdhad (2014) rapportent également que les divergences concernant le pH optimal s'expliquent aussi par la nature du substrat et la technique de digestion utilisée. En effet, le pH peut changer ou varier en raison de nombreux paramètres tels que le niveau de concentration du milieu en AGV, en bicarbonate et l'alcalinité du système. C'est pourquoi il est essentiel de contrôler et ajuster la valeur du pH en fonction du système choisi. Liu, Yuan, Zeng, Li, and Li (2008) rapportent dans leur étude que les valeurs optimales de pH simulées à différentes températures (mésophile et thermophile) sont de 7,1 et 7,2. Généralement, il est idéalement recommandé d'ajuster le pH de l'effluent à traiter dans la plage optimale neutre, c'est-à-dire un pH de 7,0 à 7,2, afin d'assurer un milieu tampon efficace à la bonne croissance de la communauté bactérienne présente.

b. L'alcalinité

L'alcalinité d'un digesteur est le pouvoir tampon ou la capacité de celui-ci à accepter des apports acides ou basiques sans modification de son pH. En d'autres termes, c'est son pouvoir à maintenir le pH du milieu stable. Il a été établi (Bernet & Buffière, 2008; Marchaim, 1994) qu'en digestion anaérobie, l'acétate et les acides gras volatils (AGV) produits durant la digestion tendent à abaisser le pH du milieu. Cependant, il existe deux systèmes tampons qui assurent la régulation du pH. Il s'agit de l'alcalinité due aux AGV et de celle due aux bicarbonates. Dans un contexte de méthanisation, c'est le bicarbonate qui assure la plus grande part de l'alcalinité. Ces ions bicarbonates HCO_3^- (en équilibre avec le dioxyde de carbone dissous) et les ions phosphates HPO_4^{2-} permettent en effet de neutraliser les acides organiques libérés (Buffiere et al., 2007). Le carbonate joue non seulement le rôle de pouvoir tampon, mais contribue aux équilibres des diverses formes du gaz carbonique dissous. Il régule les effets acides liés à la production excessive d'acide gras et lorsqu'il est en équilibre avec le gaz carbonique, il exerce une résistance à la variation du pH. Le bicarbonate constitue donc un bon agent tampon au changement de pH au cours de la digestion.

Deux autres méthodes opérationnelles permettent d'équilibrer les variations de pH dans le digesteur. La première stratégie consiste à suspendre l'approvisionnement du biodigesteur en matière organique pour réduire la concentration en acides gras du milieu produits par les bactéries. Ceci permettra de rehausser le niveau de pH à une valeur d'au moins 6,8. La seconde stratégie consiste à rajouter un agent chimique (chaux, soude) qui agira comme tampon dans la solution en fermentation. Mais la prudence est de mise ici, car la pratique peut conduire à une précipitation du carbonate de calcium, ce qui peut se révéler néfaste pour des filtres anaérobies par exemple (Moletta, 2002a).

c. La température

La température est un critère important dans le processus de la méthanisation. En effet, elle affecte la cinétique de réaction et la vitesse de transformation de la matière organique. La stabilité de la température constitue donc un facteur clé pour l'efficacité de la méthanisation. Pourtant, dans la nature, le méthane peut être formé sur une large plage de températures allant de 0 à 97 °C (Dhaked, Singh, & Singh, 2010). En général, on peut regrouper la biométhanisation en quatre grandes plages de température où différentes catégories de bactéries assurent le processus de digestion anaérobie.

La première plage de température est celle qui s'effectue préférentiellement à basse température, c'est-à-dire à une température inférieure à 20 °C. Elle met en jeu les microorganismes psychrophiles (Dhaked et al., 2010; House, 2006; Moletta, 2002a). La deuxième plage de température est celle comprise entre 20 et 30 °C. Elle est opérée par des bactéries psychrotrophes (Dhaked et al., 2010) avec un optimum à 25 °C. La troisième plage est comprise entre 30 et 40 °C. Les bactéries mésophiles sont celles qui réalisent la digestion de la matière. Ce mode de digestion est le plus courant dans les industries. Il ne nécessite pas un grand apport en énergie. La digestion mésophile assure une vitesse constante et une bonne stabilité de la digestion anaérobie (Bernet & Buffière, 2008; Doublein & Steinhauser, 2008; Dhaked et al., 2010). La dernière plage de température est comprise entre 45 et 65°C et les bactéries qui y opèrent sont dites thermophiles (Doublein & Steinhauser, 2008; Moletta, 2002a). Ce mode de digestion est de plus en plus appliqué pour le traitement de déchets solides. À température élevée, la vitesse d'hydrolyse est accélérée par rapport à la digestion mésophile et permet d'assurer un caractère plus hygiénique du traitement en ce qui a trait aux agents pathogènes. Mais en retour, elle est réputée moins stable (Bernet & Buffière, 2008).

De façon générale, les processus de biométhanisation mésophile et thermophile sont mieux compris et plus souvent appliqués que les autres. Bernet and Buffière (2008) mentionnent qu'il existe des températures optimales pour la méthanisation, particulièrement dans les plages mésophiles autour de 35 °C et thermophiles autour de 55 °C. Le maintien de la stabilité de la température est important, car la performance de la méthanisation est non seulement reliée à la température, mais aussi à la stabilité des enzymes mises en jeu. Il est reconnu que certains enzymes fonctionnent à des plages de température bien spécifiques. Au-delà de cette température spécifique, commence une phase de dénaturation de l'enzyme et une inhibition de l'activité biologique. D'où la nécessité du suivi de la température durant les processus de biométhanisation. Les bactéries méthanogènes sont les plus sensibles aux changements de température, parmi les différents microorganismes impliqués dans la digestion (Doublein & Steinhauser, 2008; Marchaim, 1994).

d. La charge appliquée

La charge appliquée dans le digesteur est définie comme le flux de matière apporté dans le réacteur. Elle détermine la quantité de matière possiblement dégradable. Différents critères analytiques sont utilisés pour le caractériser. On peut retrouver entre autres, la matière en suspension (MES) représentant l'ensemble des matières non solubles, volatiles, non volatiles. La demande chimique en oxygène (DCO) est une variable importante à suivre au cours du procédé. Elle est équivalent à la quantité d'oxydant (bichromate de potassium) assurant l'oxydation chimiquement du substrat organique. Elle donne une mesure indirecte de la concentration en matière organique dégradable. Sa mesure fournit donc une bonne appréciation de la pollution (minérale et organique) d'un substrat (Bernet & Buffière, 2008; La Farge, 1995). D'une manière générale, on peut considérer que le taux de réduction de la DCO est voisine de 50 à 60 % pour les effluents d'élevages, et de 80 à 95 % pour les effluents d'industries agroalimentaires (La Farge, 1995). Moletta (2011a) recommande dans le cas d'une digestion anaérobie d'effluents d'avoir une DCO supérieure à 2 000 mg/l afin obtenir un rendement en méthane intéressant.

e. La concentration en nutriments

La biométhanisation en bioréacteur est possible grâce à l'action des microorganismes. Ces microorganismes ont besoin d'un environnement favorable et d'éléments nutritifs essentiels (macroéléments) tels que des substrats organiques, une source de carbone ainsi que d'énergie pour leur croissance (Singh, Kumar, & Ojha, 1999). Les macronutriments les plus utilisés par les bactéries sont le carbone, l'oxygène, l'azote, l'hydrogène et le phosphore. En plus des macronutriments, un certain nombre de bactéries anaérobies exigent d'autres éléments nutritifs appelés micronutriments ou éléments traces métalliques pour mener à bien leurs fonctions métaboliques et leurs activités. Ces micronutriments sont entre autres le potassium, le calcium, le cuivre, le molybdène, le cobalt, le vanadium, le magnésium, le fer, le manganèse, le zinc, le nickel, le sodium, le bore, le sélénium, l'argent, l'or, l'iode et le titane (Cresson, 2006). Les besoins en nutriments pour la croissance des différents groupes de microorganismes ne sont pas les mêmes. Leurs concentrations peuvent être variables selon le substrat et le type de procédé utilisé. Mais il est nécessaire que leurs concentrations soient optimales pour assurer une bonne croissance cellulaire, faute de quoi une déficience en nutriments peut engendrer une limitation dans la croissance bactérienne et affecter la performance du procédé de biométhanisation.

Les microorganismes anaérobies utilisent l'azote sous forme de nitrates ou de sels d'ammonium. Or, la majorité des eaux usées en contiennent sous forme d'azote ammoniacal ou de nitrate. L'azote peut également se trouver dans les déchets organiques après leur hydrolyse. En effet, l'hydrolyse

des protéines, des acides aminés et de l'urée donne de l'azote métabolisable. Une concentration en azote inférieure à 0,3 g/l peut causer la baisse de la croissance cellulaire. Par contre, une forte concentration, soit 1,0 g/l sous forme de NH_4^+ , est préjudiciable au processus (Singh et al., 1999). L'apport des nutriments en carbone et en azote est exprimé en ratio C/N. Le ratio C/N idéal se situe entre 20 et 30. Le ratio carbone/phosphate (C/P) préconisé se situe pour sa part entre 100 et 150 (Buffière et al., 2007). Le ratio N/P optimal est évalué à 7 (Cresson, 2006).

Les éléments minéraux sont aussi importants pour l'activation et le maintien de l'activité enzymatique des microorganismes anaérobies. Les plus importants répertoriés sont entre autres le fer, le nickel, le magnésium, le calcium, le sodium et le cobalt et le molybdène (Cresson, 2006; Rajeshwari, Balakrishnan, Kansal, Lata, & Kishore, 2000; Zhang, Lee, & Jahng, 2011). Comme il s'agit d'éléments traces, il est assez difficile d'évaluer avec précision le besoin des microorganismes. Mais il est reconnu que leur déficience peut réduire la production de méthane. À l'opposé, il est établi que lorsque leurs teneurs dépassent certains seuils, les ions métalliques deviennent inhibiteurs. Il convient donc d'être extrêmement prudent lorsque l'on doit procéder à l'addition de ces composés afin d'améliorer les performances d'un procédé (Cresson, 2006). La codigestion, qui est une technique alternative qui permet la digestion anaérobie d'un mélange de matières ayant des teneurs organiques élevées, serait une technique convenable pour ajuster la concentration des éléments traces de l'effluent (Zhang et al., 2011).

f. Les inhibiteurs

Les processus de fermentation anaérobie sont reconnus pour la formation d'éléments inhibiteurs durant la digestion ((Deublein & Steinhauser, 2008; Marchaim, 1994). Ces composés organiques et éléments traces peuvent avoir un effet toxique réversible ou non sur les microorganismes. Certains peuvent se comporter en activateur ou inhibiteur lors de la digestion (Bernet & Buffière, 2008; RECORD & Couturier, 2009). Cependant, contrairement aux idées reçues, les microorganismes anaérobies, et particulièrement les méthanogènes, ne sont pas plus sensibles aux composés toxiques que les bactéries aérobies (Bernet & Buffière, 2008). Des études indiquent que les bactéries méthanogènes sont en mesure de s'acclimater à la toxicité du milieu mieux que des bactéries normales. Tout dépend du niveau de concentration des éléments inhibiteurs ou toxiques. En revanche, si les éléments toxiques sont d'origine bactérienne, le temps d'adaptation est plus long (Deublein & Steinhauser, 2008; Marchaim, 1994). D'autres facteurs interviennent dans la sensibilité des bactéries vis-à-vis de la toxicité. On peut citer entre autres les conditions du milieu (le pH, le temps de rétention), la charge totale en matière sèche (CMS) et le taux de charge en matière organique (TCMO) (Marchaim, 1994).

- L'ammoniaque

Au cours de la digestion anaérobie, les composés azotés (protéines et acides aminés) sont dégradés sous forme ammoniacale (NH_3) et en ion ammonium (NH_4^+) dans le milieu. L'azote ammoniacal (NH_3) présente un effet inhibiteur de la méthanisation et plus particulièrement pour la méthanogenèse acétoclaste (Bernet & Buffière, 2008). Cet effet inhibiteur est principalement dû à la forme libre NH_3 . La toxicité de l'ammoniaque est dépendante des équilibres des réactions, de la température et du pH du milieu. Le ratio $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ est de 99:1 à pH 7 et de 70:30 à pH 9 (Buffière et al., 2007; Deublein & Steinhauser, 2008; Marchaim, 1994).

- Les acides gras volatils

Ils sont issus de la décomposition de la matière organique durant la phase méthanogène. Ils peuvent avoir des effets limitants sur le processus de digestion. Leur accumulation dans le milieu n'est pas seulement problématique dans l'acidification du substrat, mais peut provoquer l'inhibition de l'activité métabolique en pénétrant les espaces lipidiques des cellules bactériennes. En effet, certains acides volatils tels que les acétates, les propionates ou les butyrates sont associés aux processus d'inhibition (Marchaim, 1994). Mais l'acide propionique (à une concentration supérieure à 700 mg/l) demeure le plus toxique parmi les autres acides (Buffière et al., 2007; Marchaim, 1994).

II. Les technologies de biométhanisation existantes

La première fonction d'un digesteur est de permettre la digestion anaérobie des effluents ou substrats pour donner le biogaz. Si l'on s'appuie sur les critères exogènes d'un digesteur (le coût, l'efficacité du traitement, les rendements nets, la facilité d'exploitation), les réacteurs varient beaucoup selon leur niveau de sophistication, que ce soit à l'échelle familiale ou industrielle (Marchaim, 1994). Il existe diverses technologies de mise en œuvre de la digestion anaérobie. On peut les classer selon différents critères : soit sur le type de charge acceptée ou soit sur le mode de fonctionnement.

1. La classification des biodigesteurs

a. Le type de charges

La teneur en eau est un aspect capital pour la digestion anaérobie. La littérature indique que les procédés de biométhanisation peuvent être classés selon la siccité de la charge à l'intérieur du biodigesteur. On établit deux grandes approches pour la digestion anaérobie.

- Les procédés de fermentation « humide » : ici, la teneur en matière sèche organique est comprise entre 5 et 20 % (Moletta, 2011b). Ce type de fermentation est largement utilisé dans les cas où le mélange solide-liquide de l'effluent est plus homogène (lisier, eaux usées...). Il est habituellement recommandé d'être dans les conditions où le substrat est formé de 10 % de matière sèche et 90 % d'eau (House, 2006, pp. 46-47).
- Les procédés de fermentation « sèche » : ici, la teneur en matière sèche organique est généralement de 20 à 50 %. La matière se présente sous forme pâteuse ou semi-solide. Au-dessus de 55 %, on se retrouve en milieu difficilement traitable par voie microbienne, car la surface de contact des microorganismes avec la matière est réduite comparativement au procédé humide (Perron, 2010).

b. Le mode de fonctionnement

- Le mode continu

Ce type de mode est le plus fréquemment rencontré à l'échelle industrielle. Les réacteurs continus sont alimentés en permanence à un régime dit « nominal », qui correspond en général à un débit (ou flux de matière) constant. Le système continu fonctionne donc permanemment à volume constant d'effluent et en parallèle. Il génère et évacue une quantité égale de résidus digérés et de biométhane (Bernet & Buffière, 2008).

- Le mode discontinu (*batch*)

Le fonctionnement en mode discontinu s'effectue par bâchées successives. Le digesteur est initialement rempli et ensemencé, puis la réaction se déroule sans échange ou approvisionnement de matières avec l'extérieur. Les réactions de méthanisation sont continues durant le temps de séjour du substrat. La production de biogaz se produit ainsi en suivant une forme de cloche. Une fois la matière complètement digérée et le gaz libéré, le réacteur est vidangé et un nouveau lot est introduit pour démarrer une nouvelle fermentation (Bernet & Buffière, 2008).

- Le mode séquentiel (SBR)

Le mode *sequencing batch reactor* (SBR) est un modèle de fonctionnement hybride entre le continu et le discontinu. Il combine les deux modes afin de maximiser les avantages de chacun. Le principe est d'appliquer, dans un réacteur, des cycles alternant le remplissage, la réaction, la décantation et la vidange. Cette façon permet de conserver en tout ou en partie des microorganismes actifs dans le digesteur pour le cycle suivant. Ce mode de fonctionnement est relativement approprié aux petites installations (Bernet & Buffière, 2008).

2. Les grandes familles de procédés de méthanisation

Dans la conception des réacteurs, on peut distinguer deux grandes familles de procédé :

- a. Les procédés utilisant les réacteurs à cellules libres

Ils s'appliquent principalement aux substrats ayant des teneurs élevées en matières solides. Ce type de réacteurs est qualifié de « première génération », car ils sont les premiers à avoir été conçus (La Farge, 1995; Moletta, 2002a). Dans ce type de digesteur, les microorganismes se trouvent sous forme libre ou en floc (agrégats de bactéries). Ils sont soit retenus dans le réacteur en maîtrisant l'hydrodynamique, soit récupérés dans un décanteur externe et remis en partie dans le volume réactionnel.

Les principaux réacteurs à cellules libres sont les suivants :

- Les réacteurs à cellules libres

Au départ, c'étaient des réacteurs conçus pour la digestion aérobie des boues de station d'épuration. À présent, ils ont été transformés en unités de traitement formées principalement d'un récipient, à l'abri de l'air, comportant un mélangeur mécanique, ou d'un système de recirculation de biogaz pour assurer l'homogénéisation du milieu (figure 2). Un décanteur est placé après le réacteur pour permettre le recyclage des microorganismes et augmenter leur temps de séjour. Ce type de digesteur est bien adapté au traitement d'effluents chargés de matière en suspension.

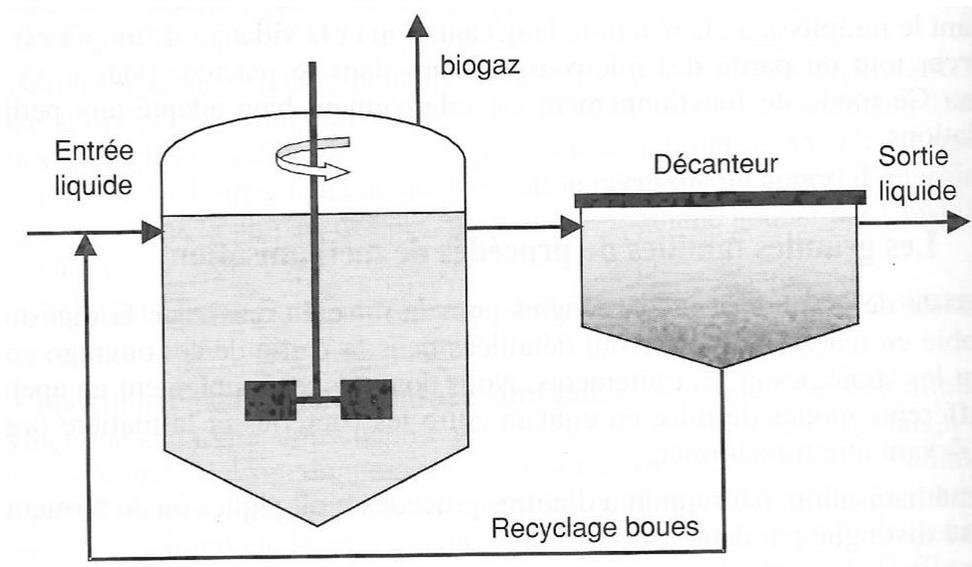


Figure 2: Réacteurs à cellules libres agités avec recyclage de biomasse (Bernet & Buffière, 2008)

- Le réacteur à lit de boues

Le principe du réacteur à lit de boues (figure 3) consiste à faire passer l'effluent à traiter à travers un lit de boues, au-dessus duquel se forme une séparation boues/liquide (Moletta, 2002a). Dans ce type de procédé, les microorganismes forment des floccs qui permettent de maintenir une forte concentration cellulaire entre le haut et le bas du lit de boues. Sur les matières minérales en suspension dans le milieu liquide, se développent des granules, qui emprisonnent une partie des microorganismes, leur permettant de rester dans le réacteur. La maîtrise de l'hydraulique constitue le point important de l'efficacité de ce réacteur. Pour cette technologie, la vitesse ascensionnelle de l'eau est relativement faible, de l'ordre du mètre par heure, voire moins. Cela permet d'avoir une meilleure décantation. La décantation a pour rôle d'augmenter le temps de séjour des particules (La Farge, 1995; Moletta, 2002a). La maîtrise de l'hydraulique s'avère capitale pour garantir une bonne rétention des boues.

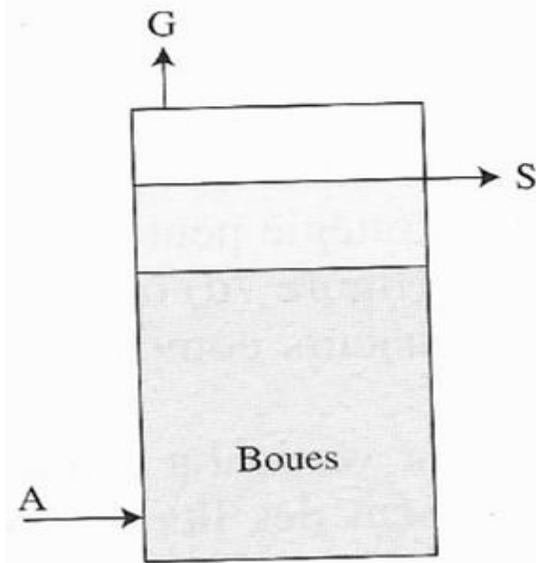


Figure 3: Réacteur à lit de boues (Moletta, 2011c) (A : Alimentation, G : Biogaz, S : Sortie de l'effluent)

- Le réacteur à compartiments

Le réacteur à compartiments est conçu de façon à avoir des séries de compartiments contenant des lits de boues anaérobies (figure 4). Ils peuvent être distribués horizontalement comme verticalement et la répartition de l'alimentation peut se faire dans plusieurs compartiments avec des proportions différentes (Moletta, 2011b). Ce type de technologie présente l'avantage de capter immédiatement l'hydrogène formé dans la phase acidogène. Cela permet d'éviter des inhibitions possibles de l'acétogénèse et de la méthanogénèse acétoclaste par l'hydrogène (Moletta, 2002a).

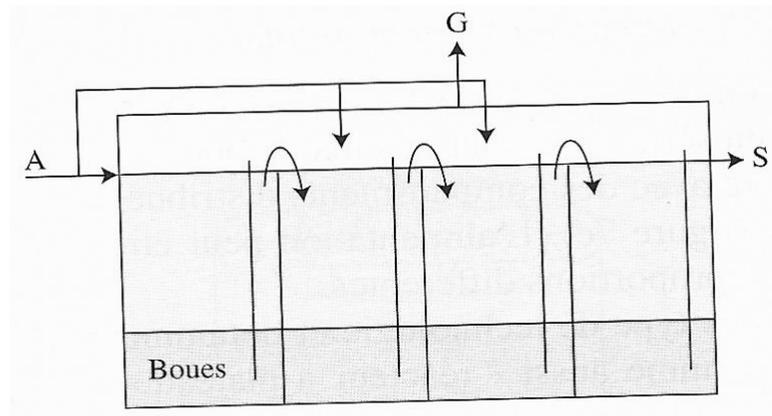


Figure 4: Réacteur à compartiments (Moletta, 2011c) (A : Alimentation, G : Biogaz, S : Sortie de l'effluent)

- Le bassin de méthanisation

Le bassin de méthanisation est un bassin de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes qui contient un lit de boues anaérobies (figure 5). Le dispositif est couvert par une couverture flottante permettant de récupérer le biogaz produit et de contenir les éventuelles émanations d'odeurs. La température du système n'étant pas régulée, une bonne isolation du procédé assure le maintien de la température à une valeur acceptable pour les activités et les réactions biologiques (Moletta, 2011b). Un système de brassage séquentiel ou un garnissage à l'intérieur des lagunes anaérobies est mis en place afin d'assurer une bonne répartition des microorganismes dans toute la masse liquide.

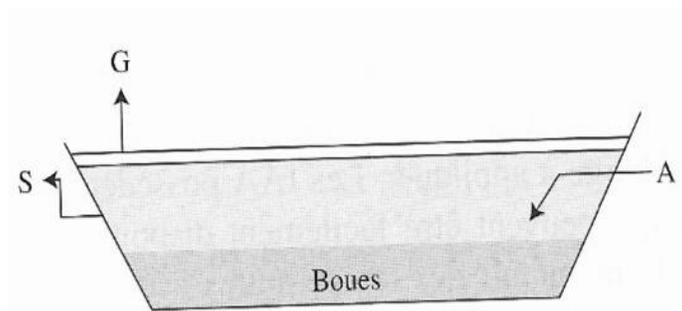


Figure 5: Réacteur à bassin (Moletta, 2011c) (A : Alimentation, G : Biogaz, S : Sortie de l'effluent)

- b. Les procédés utilisant les réacteurs à cellules « fixées »

L'avancée des recherches sur la technologie des digesteurs a permis de faire un bond énorme dans la conception des réacteurs. Pour ne plus avoir recours au procédé de séparation, d'autres modèles de réacteurs plus élaborés ont été développés. Il s'agit des réacteurs à cellules immobilisées ou lit fixe. Ils sont identifiés « réacteurs de seconde génération ». Ici, les microorganismes, en présence d'un support, colonisent la surface du support et forment un biofilm. Au sein de ce biofilm, la chaîne trophique s'organise plus efficacement que lorsqu'elle était en suspension (Bernet & Buffière, 2008). De cette façon, ces réacteurs offrent des caractéristiques de sédimentation supérieures aux cellules libres et aux flocs microbiens (Moletta, 2002a). On évalue que leur performance est de 5 à 20 fois plus élevée que celle des réacteurs à cellules libres (Bernet & Buffière, 2008). On peut rencontrer deux sortes de biofilms. Il y a ceux qui sont formés sur les supports organiques ou minéraux et ceux qui forment des granules. En effet, dépendamment des conditions, certains microorganismes ont la caractéristique de former spontanément des granules (Moletta, 2002a). C'est un mélange de microorganismes qui s'agglomèrent pour former une bille de quelques dizaines de microns à plusieurs millimètres de diamètre. L'avantage afférent à

l'utilisation des cellules immobilisées est la possibilité de concentrer la biomasse, ce qui permet ainsi de réduire les volumes réactionnels nécessaires (Bernet & Buffière, 2008; Moletta, 2002a).

- Le réacteur UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

Le réacteur UASB a été développé par Gätze Lettinga et ses collaborateurs dès la fin des années 1970 aux Pays-Bas. Appelé procédé à flux ascendant en couches de boues anaérobies ou *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), il est l'un des réacteurs les plus étudiés et appliqués dans le traitement des eaux usées (Deublein & Steinhauser, 2008; Marchaim, 1994). Le réacteur comprend un réservoir cylindrique vertical sans garnissage (Figure 6), dans lequel les substrats remontent en force à travers un lit de boue anaérobie occupant la moitié du volume (Cresson, 2006; Marchaim, 1994). La technologie se base sur le principe de la formation de granules. L'effluent est réparti sur le bas du réacteur et traverse un lit de boues. La biomasse retenue dans le réacteur, formant un lit de boue, est floculée par les microorganismes anaérobies pour former des granules. Il faut noter que la floculation biologique s'effectue lentement et de façon régulière dans le temps. Cela fixe correctement la biomasse active dans le digesteur et assure une bonne formation de granules, pouvant atteindre 5 mm de diamètre. Cela leur confère de bonnes caractéristiques de sédimentation et de résistance mécanique (Cresson, 2006; Moletta, 2011b). Le réacteur est équipé d'un cône inversé, placé dans la partie supérieure de la cuve, permettant d'assurer la séparation des éléments gaz-liquide-solide (Deublein & Steinhauser, 2008; Marchaim, 1994). Cette méthode facilite l'évacuation du biogaz, et limite la perte ou la sortie des matières en suspension (Cresson, 2006). Dans l'enceinte du digesteur, l'agitation du substrat est principalement assurée par le flux de liquide et les bulles de biogaz produites. Le réacteur UASB peut tolérer le traitement d'effluents à fortes concentrations de solides. Pour des effluents industriels particulièrement solubles (eaux de lavage des féculeries), le réacteur peut traiter des charges allant jusqu'à 40 kg de DCO/m³/jour avec un temps de passage réduit à 3,5 heures. Il peut aussi être appliqué aux stations d'épuration municipales, en particulier dans les pays chauds. Pour des températures supérieures à 12 °C, il est possible d'éliminer près de 60 % de la DCO de départ (Marchaim, 1994). Le principal problème du réacteur UASB concerne le contact entre les organismes microbiens et l'effluent. Certains effluents ne permettent pas la formation et le maintien de boues granulaires.

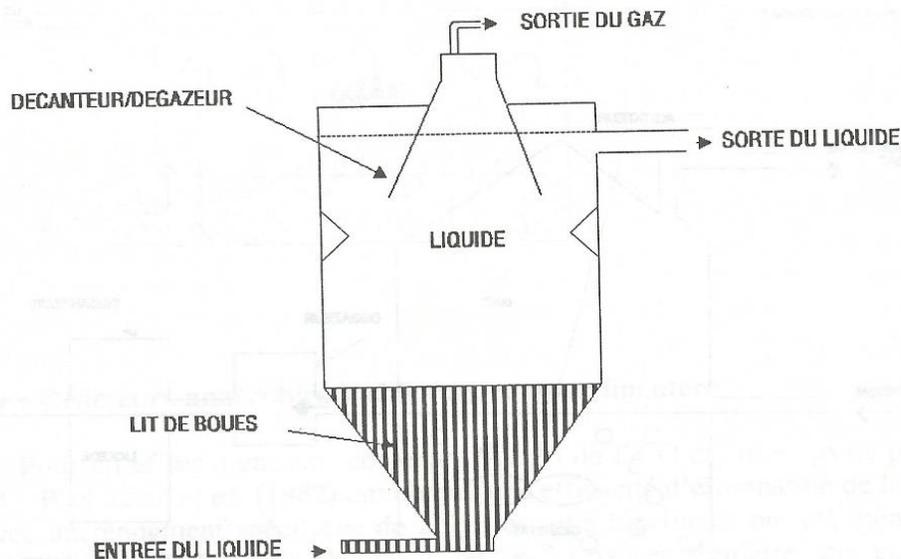


Figure 6: Réacteur UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) (Marchaim, 1994)

- Le réacteur à filtre anaérobie

Cette technologie est munie d'un filtre anaérobie conçu avec un support fixe (figure 7). Le principe est que le support (ou « garnissage ») est colonisé par les bactéries pour former des biofilms (La Farge, 1995; Moletta, 2002a). Le support peut être réparti en vrac dans le digesteur ou de façon orientée. On distingue alors deux types de réacteurs suivant la mobilité du support. Lorsque le support est immobile (orienté), on parle de *filtres anaérobies*, et s'il est mis en suspension (en vrac), on parle de *lits fluidisés* (La Farge, 1995). Le principe de fonctionnement du digesteur est de faire traverser l'effluent à traiter à travers le filtre anaérobie par flux ascendant ou descendant. Ainsi, l'effluent distribué peut traverser le garnissage soit sur le bas, soit sur le haut du réacteur. Les caractéristiques des supports conditionnent les conditions hydrodynamiques appliquées (Moletta, 2011c). Afin de faire travailler l'ensemble du réacteur de la manière la plus homogène possible, un recyclage de l'effluent peut être effectué (Moletta, 2011c).

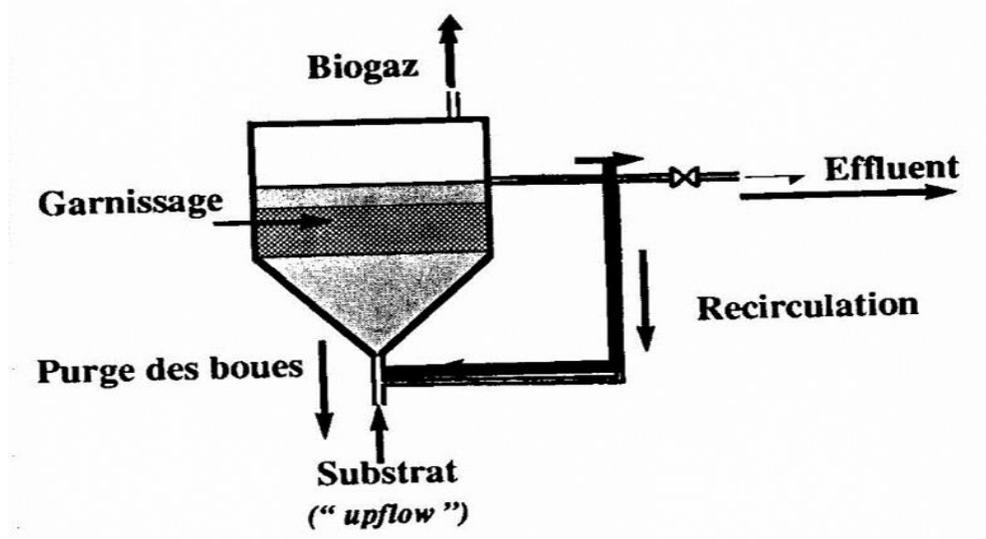


Figure 7: Réacteur à filtre anaérobie (La Farge, 1995)

- Le réacteur à recirculation interne

Le réacteur à recirculation interne se sert du biogaz produit pour agiter le milieu (figure 8). Le principe de fonctionnement est le suivant : dans le compartiment (1), les boues anaérobies méthanisent la matière organique et le biogaz collecté entraîne, dans une canalisation, le mélange boues-liquide-biogaz. Ce dernier est séparé en haut du réacteur (compartiment 3) et le mélange, liquide plus boues, redescend. Ceci conduit à une agitation naturelle du système. Le liquide passe de la chambre (1) à la chambre (2) qui retient les boues dans le digesteur. Le peu de biogaz formé ici est récupéré, et le liquide passe dans la chambre (4) qui joue le rôle de décanteur (Moletta, 2011c).

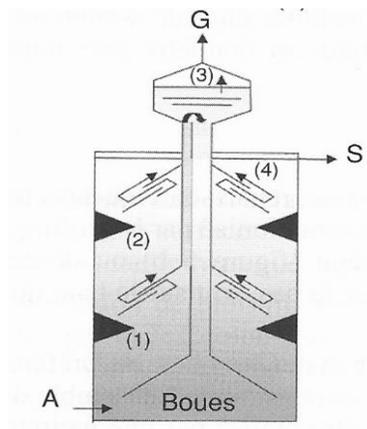


Figure 8: Réacteur à circulation interne (Moletta, 2011c) (A : Alimentation, G : Biogaz, S : Sortie de l'effluent)

Pour des raisons de traitement d'effluent et des déchets, une large gamme de réacteurs biologiques (cellules libres, biofilms) a pu voir le jour avec la recherche. L'intérêt pour l'exploitation des effluents à des fins énergétiques devient donc grandissant. À titre d'exemple, les réacteurs à lits tabulés, « hybrides » et d'autres encore plus élaborés font désormais partie des procédés de la biométhanisation. Mais comme cela a été démontré, le choix de la technologie de digestion à appliquer repose sur de nombreux critères essentiels à savoir : le type d'effluent, la température et la situation climatique de la zone, le niveau de technologie demandé, etc. Dans la prochaine section, nous allons faire un tour d'horizon des différents modèles de digesteurs utilisés dans le monde.

3. Les principaux biodigesteurs utilisés dans le monde

Les années 80 ont marqué l'expansion des unités de biométhanisation. Les entreprises œuvrant dans le domaine ont d'abord mis en place des projets pilotes afin de s'assurer de la performance des technologies dans un contexte géographique donné, avant l'emploi à grande échelle des usines de biométhanisation des matières résiduelles municipales et mixtes. En ce qui a trait aux coûts d'implantation et d'exploitation des usines, il est assez difficile de les déterminer, car chaque projet est unique et a ses propres objectifs spécifiques. Dans ce sens, peu de données sont disponibles pour nous aventurer dans une analyse économique approfondie. Les nations européennes sont les leaders et également les pionniers dans le domaine. Elles sont arrivées à promouvoir la technologie à travers le monde. En 2002, on estimait qu'il y avait déjà près de 70 usines de digestion anaérobie implantées en Europe (Egigian Nichols, 2004).

a. Les technologies européennes et américaines.

Les installations d'usines de digesteurs anaérobies sont relativement bien établies en Europe par rapport à l'Amérique du Nord. En Allemagne, comme au Danemark, en France, en Belgique, en Angleterre et autres, une cinquantaine d'usines de traitement de résidus organiques municipaux sont équipées de la technologie de digestion anaérobie. Ces usines sont capables de traiter entre 50 000 et 80 000 tonnes de déchets organiques par an (Amarante, 2010; Zaher, Cheong, Wu, & Chen, 2007). Les exemples de procédés les plus répandus en Europe sont les suivants :

- **La technologie Kompogas**

Le système Kompogas est caractérisé par un procédé de digestion anaérobie en une seule phase. Le réacteur est cylindrique et positionné horizontalement à écoulement piston (figure 9). Il fonctionne en mode continu, thermophile et en fermentation sèche (substrat pouvant atteindre une siccité variant entre 23 et 28 %) (Amarante, 2010; Ostrem, 2004).

La technologie a été développée en Suisse, dans la fin des années 1980, par Walter Schmid,

avec une première usine commerciale implantée en 1991. Désormais, la société identifie plus de 35 usines en construction ou en planification (Kompogas, 2007). En Suisse, le système est notamment en application dans la ville de Rümlang, avec une capacité de traitement de 4 000 t de résidus par an, ainsi qu'à Bachenbülach et Samatagen, avec chacune 10 000 t de résidus par an. Des installations existent également dans d'autres pays (Amarante, 2010; Kalogo & Verstraete, 2002; Kompogas, 2007).



Figure 9: Digesteur Kompogas (Kompogas, 2007)

- **La technologie Valorga**

Le procédé Valorga a été spécialement développé pour le traitement de la fraction organique des eaux usées municipales et des déchets ménagers issus d'une collecte sélective ou non. Il a été développé en France dans les années 80 et la première station a été installée à Amiens (France) en 1988 avec une capacité de traitement de 55 000 t par an. À partir de 1996, des aménagements ont permis d'atteindre une capacité de 85 000 t de résidus par an (Amarante, 2010; Moletta, 2002a). La technologie Valorga (figure 10) est caractérisée par une digestion sèche en continu (25-35 %) de type piston horizontal. Elle fonctionne en mode mésophile ou thermophile. Elle ne requiert pas de système mécanique d'agitation. Le système d'agitation du mélange de la matière organique au sein du réacteur est pneumatique : il consiste à faire recirculer sous pression le biogaz produit au bas du réacteur dans l'axe vertical (Deublein & Steinhauser, 2008; Moletta, 2011b; Valorga, 2016). Grâce à son système pneumatique, cette technologie empêche la décantation des particules lourdes, permettant ainsi une disponibilité optimale du substrat. La conception

du digesteur impose une progression séquentielle de la matière au fur et à mesure de la digestion, ce qui garantit une hygiène optimale et constante du produit (Valorga, 2016). Ce procédé permet une production de biogaz variant entre 100 et 140 Nm³ par tonne de déchets, pour une concentration en méthane d'environ 55 %. Avec 12 installations en fonctionnement partout dans le monde (France, Espagne, Italie, Allemagne, Suisse, Belgique, Pays-Bas, Portugal et Chine), les usines ont des capacités de traitement d'effluent allant de 10 000 à 300 000 t/an (Valorga, 2016).

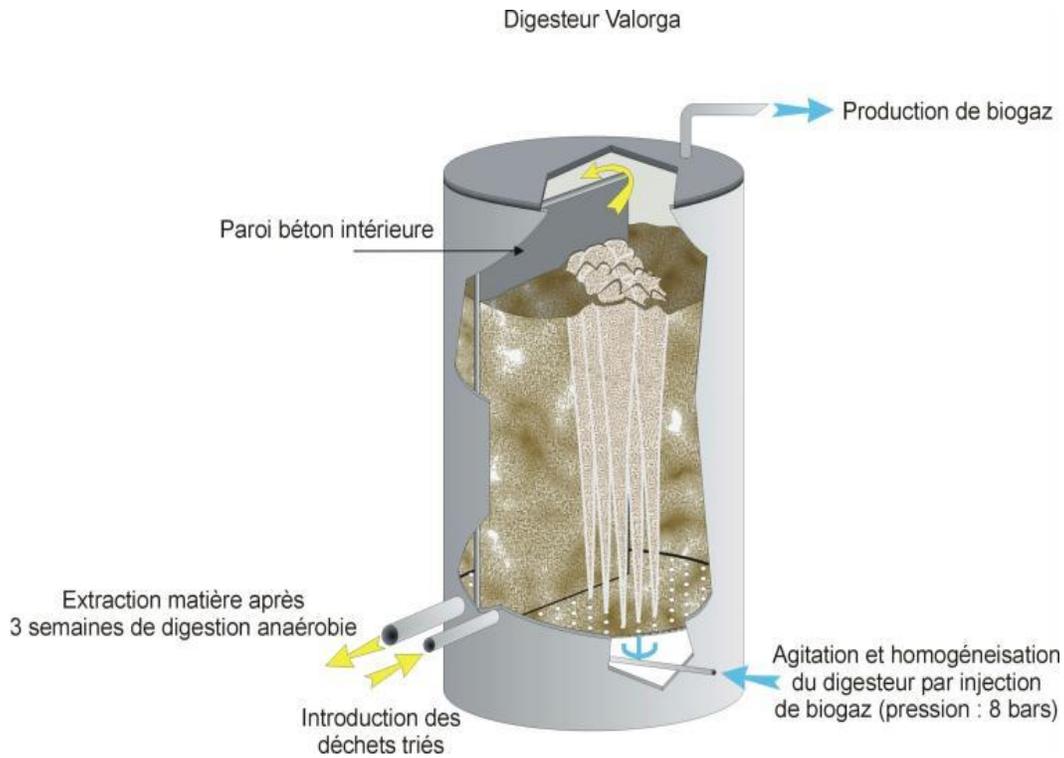


Figure 10: Digesteur Valorga (Valorga, 2016)

- **La technologie DRANCO**

Le système DRANCO ou *DRy ANaerobic COMposting* est un procédé biotechnologique avancé destiné au traitement écologique et économique des déchets organiques ménagers. Il a été initié par les études de De Baere et Verstraete (1984) à l'université d'État de Gand en Belgique. La société belge *Organic Waste Systems* (OWS) peut être considérée comme pionnière, avec la construction de la première unité pilote utilisant la technologie DRANCO à Gent (Belgique) en 1984 (Amarante, 2010; Ostrem, 2004). Le système DRANCO est un réacteur cylindrique vertical à écoulement piston (figure 11). Il est caractérisé par une digestion sèche (jusqu'à 40 %), en continu en une étape et en mode

thermophile ou, dans quelques cas précis, mésophile. L'alimentation du digesteur se fait par le sommet et le mouvement du substrat est assuré par la force de gravité de l'entrée de l'effluent qui s'effectue du haut vers le bas. Le système d'homogénéisation est assuré par la recircularisation à l'intérieur du réacteur d'une partie des résidus contenus au bas du réacteur. La production de biogaz varie de 100 à 200 Nm³ par tonne de déchets (Amarante, 2010; Ostrem, 2004).

La spécificité du procédé DRANCO est qu'il n'y a pas d'ajout d'eau ou d'autre forme d'hydratation du substrat outre la vapeur d'eau pour le chauffage. De cette manière, les intrants peuvent contenir jusqu'à 40 % de matière sèche à l'entrée du réacteur. Cela réduit les besoins en eau pour le procédé, entraînant du coup une diminution de la taille des réacteurs (Amarante, 2010). La station la plus importante en capacité de traitement de résidus est celle de Salzburg en Autriche (20 000 t/an). D'autres stations sont présentes à Brecht en Belgique (10 000 t/an), à Aarberg en Suisse (11 000 t/an) et à Bassum en Allemagne (13 000 t/an) (Moletta, 2002a; OWS, 2016).



Figure 11: Digesteur DRANCO (OWS, 2016)

- **La technologie Lipp**

La technologie Lipp a débuté avec les essais expérimentaux de Xaver Lipp en 1971 dans sa ferme familiale où les silos ont été utilisés d'abord comme cuve réacteur. Ensuite, prise en charge par les universités Weihenstephan et Hohenheim (Allemagne), la technologie a connu un développement important. De nos jours, on en compte quatre types de fermenteurs optimisés pour diverses applications (Lipp, 2016). Le digesteur Lipp fonctionne en fermentation humide (jusqu'à 10 % de siccité), alimenté en continu dans un réacteur horizontal en acier inoxydable appelé KomBio (figure 12). Le système de

chauffage du digesteur se fait par un réseau de tuyaux chauffants avec un haut niveau de transfert d'énergie, et est situé entre l'isolant et la paroi métallique (Amarante, 2010; Dominion & Grimm Environnement inc., 2016). Le substrat est homogénéisé horizontalement et verticalement grâce à deux mélangeurs, un disposé latéralement au réacteur et l'autre dans sa partie supérieure. Le digesteur peut être optimisé en rajoutant des modules supplémentaires afin d'augmenter l'efficacité de la méthanisation avec des traitements en amont ou en aval du procédé (Amarante, 2010; Lipp, 2016). Selon Bio-Méthatech (Amarante, 2010), le procédé Lipp peut atteindre des concentrations de méthane variant entre 60 et 75 %. Elle est une technologie relativement nouvelle en Amérique du Nord, mais a été largement testée dans plusieurs pays d'Europe et ailleurs dans le monde. Actuellement, plus de 700 digesteurs anaérobies Lipp sont en place dans les stations de traitements de résidus agricoles, industriels et municipaux. L'entreprise a un représentant au Québec qui est Dominion & Grimm Environnement. Elle est capable de fabriquer au Québec la majorité des composantes du procédé avec l'assistance des services-conseils de Bio-Méthatech (Amarante, 2010).

À ce propos, en 2010, la Ville de Saint-Hyacinthe a été identifiée comme l'une des premières villes d'Amérique du Nord à s'équiper de la technologie et à produire du biogaz à partir des résidus organiques des citoyens et des entreprises agroalimentaires de la région. La capacité de l'usine de biométhanisation de Saint-Hyacinthe est estimée à 13 millions de mètres cubes de biogaz par an (Saint-Hyacinthe, 2016).

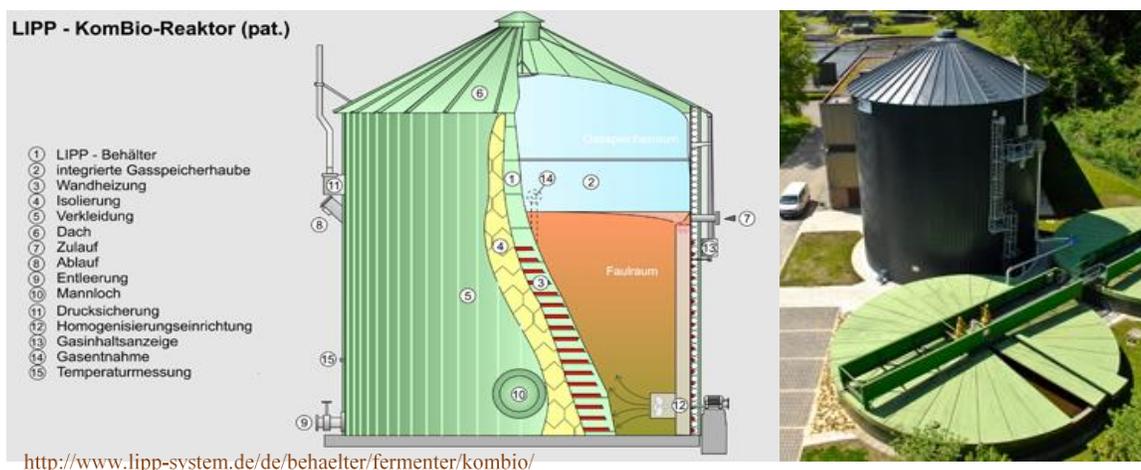


Figure 12: Digesteur Lipp (Lipp, 2016)

b. Les technologies asiatiques

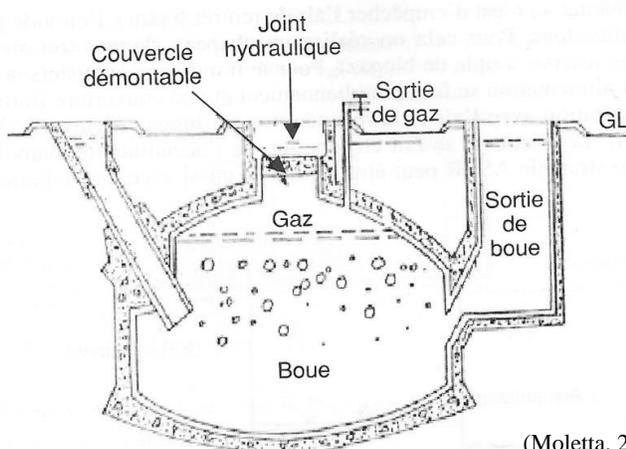
La technologie du biogaz, aussi rentable sur le plan de la gestion des résidus que sur le plan énergétique, est importée partout dans le monde. Le continent asiatique a connu un boom démographique dans les années 1950, ce qui a occasionné une intensification de sa production agricole et une hausse des déchets afférents. Ainsi, après la première crise énergétique mondiale en 1973, beaucoup de pays asiatiques se sont davantage intéressés aux filières de la transformation des déchets en énergie et produits utiles. En 1975, au Népal, un Comité de développement du biogaz (BDC) a vu le jour à l'Université de Tribhuvan (Karki et al., 2015). En Chine, malgré que le biogaz ait été découvert à la fin du 19^e siècle, le développement de l'industrie du biogaz a connu son essor à partir des années 1975. En 2000, le gouvernement chinois, pour stimuler l'utilisation massive du biogaz, a initié des projets de construction d'unités de biogaz avec un accent porté sur les modèles domestiques. Au Bangladesh, la première usine de biogaz a été construite en 1972 dans les locaux de la *Bangladesh Agriculture University* (BAU). Depuis lors, diverses organisations ont construit des usines de biogaz sous différents programmes et à différents moments (Karki et al., 2015), si bien que le virage technologique a conquis l'ensemble des autres pays asiatiques.

En Asie, compte tenu de la forte population, encore rurale et pauvre, la technologie des biodigesteurs s'est développée sous deux formes. On retrouve les digesteurs industriels et domestiques. Nous allons présenter à la suite quelques modèles de digesteurs domestiques développés dans certains pays d'Asie.

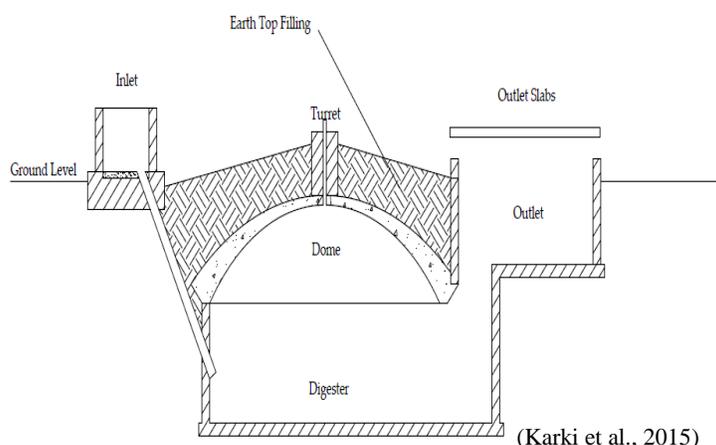
- **Le digesteur à dôme fixe (type chinois)**

Le digesteur à dôme fixe est un modèle typiquement domestique de conception chinoise, qui date des années 1930. Depuis lors, d'importantes améliorations ont été réalisées avec des modèles variables (Karki et al., 2015; Marchaim, 1994). Cette technologie fournit non seulement du gaz de cuisson propre, mais entraîne aussi des avantages sanitaires et agricoles considérables. Le digesteur est constitué d'une chambre à digestion souterraine et, par-dessus, d'un dôme en béton étanche pour le stockage du gaz. L'ensemble forme une unité construite avec des briques, des pierres, du béton et du ciment. Le réacteur est essentiellement hémisphérique (figure 13). La partie intérieure est enduite de plusieurs couches de mortier pour améliorer l'étanchéité. Le réacteur est caractérisé par une alimentation discontinue (une fois par jour) de fumier ou d'excréments humains. La fermentation est en mode mésophile humide avec une concentration en matière sèche de l'ordre de 5-8 % pour le lisier de bovin et 4-7 % pour le lisier de porc. La capacité utile du digesteur est variable (6, 8 et 10 m³) et le tiers du réacteur sert au stockage du gaz. La

production de biogaz fluctue entre 0,15 et 0,30 m³ par jour selon la température et la capacité du digesteur. On estime à 40 % le pourcentage de réduction des matières organiques et le temps de rétention est de 35 à 40 jours (Karki et al., 2015; La Farge, 1995; Marchaim, 1994). Les principales difficultés que rencontrait ce modèle étaient principalement son défaut d'étanchéité et l'accumulation au fond du réacteur des matériaux solides non digérés. Ceci causait des fuites de gaz et nécessitait des vidanges régulières. Le modèle a connu des développements et est désormais bien au point. Il fait l'objet d'une standardisation au niveau national. À ce propos, jusqu'en 2014, environ 42,6 millions de digesteurs avaient été installés dans les zones rurales et l'objectif pour 2020 est de 80 millions. Ce type de digesteur est le plus répandu dans les pays en développement (Karki et al., 2015; Marchaim, 1994).



(Moletta, 2011b)



(Karki et al., 2015)

Figure 13: Digesteur à dôme fixe

- **Le digesteur Gobar (type indien KVIC)**

Pour économiser l'énergie, prévenir la déforestation, réduire l'érosion des sols et préserver la biomasse recyclable, le Gouvernement de l'Inde a instauré un vaste programme d'utilisation du biogaz. L'accent a été mis premièrement sur la construction de biodigesteurs de taille familiale. Par la suite, afin de produire du gaz de cuisson bon marché, des installations de biodigesteurs communautaires et institutionnels ont été mises en place. Cela facilitait l'accès au biogaz pour les populations rurales pauvres ne pouvant pas installer les leurs (Marchaim, 1994). Dans ce processus d'expansion des biodigesteurs, le digesteur « Gobar » (« fumier de bétail » en hindi) (Moletta, 2011b), conçu par Jasu B. J. Patel en 1956 et approuvé par la commission Khadi Village Industries Commission (KVIC) de

Bombay, a été choisi et rapidement amélioré et popularisé. Il est formé d'une chambre de digestion cylindrique, construite en briques et ciment, enterrée verticalement. Un couvercle en acier doux est placé au-dessus de la chambre de digestion pour stocker le gaz produit (figure 14). Il existe ainsi une barrière qui sépare en deux sections distinctes le biodigérateur : une section pour la production et l'autre pour la collecte et le stockage du gaz. Lorsque le méthane est produit, la pression du gaz pousse le tambour vers le haut et il redescend progressivement lorsque le gaz est consommé. De cette façon, le niveau du tambour permet d'évaluer le volume de gaz disponible (Amarante, 2010; Karki et al., 2015). Le digesteur fonctionne en alimentation discontinue de bouse de vache. La fermentation s'effectue en mode mésophile humide (jusqu'à 18 % de matière sèche), ce qui permet de récupérer 35 à 45 L de biogaz à 60 % de CH₄ (soit 195-250 L de biogaz/kg de MS). Les petites unités domestiques ne sont ni chauffées ni mélangées et le temps de séjour moyen est de 35 à 52 jours en fonction de la température et de la dilution du substrat. Ceci équivaut à une charge organique moyenne de 1,35 à 2,57 kg MS/m³ de digesteur par jour (Moletta, 2011b). Le volume des digesteurs varie de 2 à 140 m³, mais les plus répandus ont un volume de 4 à 30 m³ (La Farge, 1995). Le modèle Gobar fut rebaptisé biodigérateur cylindrique à dôme flottant. Avec l'introduction des digesteurs à dôme fixe de type chinois, les digesteurs à couvercles flottants sont devenus obsolètes en raison de leurs coûts d'investissement et d'entretien plus élevés en plus d'autres faiblesses de conception.

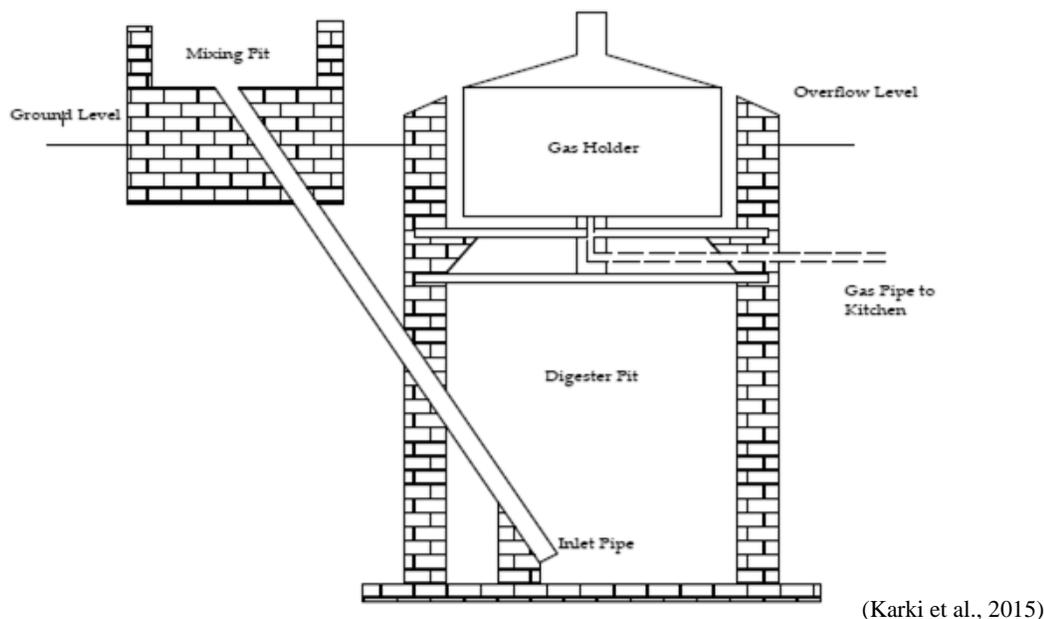


Figure 14: Digesteur à dôme flottant

- **Le digesteur à enveloppe souple de Taïwan**

C'est un modèle des années 60, conçu à Taïwan et élaboré pour remplacer les digesteurs métalliques et en briques. Le dispositif est constitué d'un long sac cylindrique horizontal de tissu PVC à base de nylon renforcé au néoprène. Les tubes d'admission et d'évacuation sont soudés au sac. Il en est de même pour la canalisation de dégazage soudée au-dessus du sac (figure 15). Le digesteur de type bâche fonctionne en alimentation discontinue au fumier animal. La fermentation s'effectue en mode mésophile humide. Le temps de rétention normal varie de 60 jours à 15-20 °C à 20 jours pour une température de 30-35 °C. Un des avantages de ce modèle est la faible épaisseur des parois, rendant plus facile le réchauffement de son contenu par le soleil ou toute autre source de chaleur extérieure (Marchaim, 1994). Il a été démontré que la température interne pouvait être de 2 °C plus élevée à 7 °C plus faible que la température externe. De ce fait, les rendements en biogaz étaient susceptibles de varier de 30 à 300 % de celui du digesteur à dôme fixe (Marchaim, 1994).

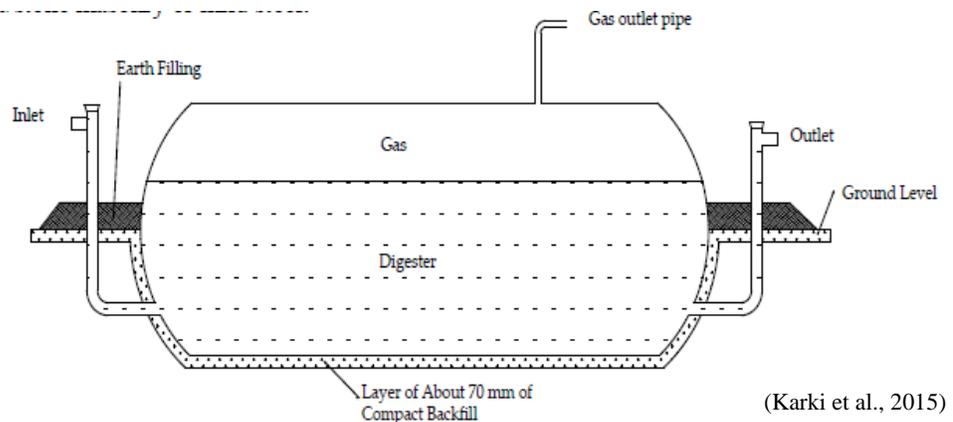


Figure 15: Digesteur à bâche souple

c. Les technologies africaines

La réussite des programmes de développement et d'adoption en masse du biogaz en Asie a attiré de nombreux pays africains. La technologie du biogaz devient de plus en plus une aubaine et une source d'énergie renouvelable pour les ménages et les petites et moyennes fermes rurales dans plusieurs pays du continent africain. Conscients des réels avantages du biogaz dans le processus de développement de leurs communautés, plusieurs pays africains adoptent le concept d'installation de biodigesteurs pour améliorer la gestion des déchets et effluents municipaux.

Pour parvenir au développement de la technologie, ces pays ont bénéficié du soutien de nombreuses organisations gouvernementales et organisations d'aide au développement (FAO, UNIDO, OMS,

PNUE) (Marchaim, 1994). La prise en compte des enseignements tirés de l'Asie a facilité l'implantation et la réussite des programmes de biogaz en Afrique.

Par exemple, en décembre 2008, le ministère néerlandais des Affaires étrangères, à travers la Direction générale de la coopération internationale (DGIS), a confirmé son engagement à soutenir le développement des énergies renouvelables et à appuyer financièrement des pays africains dans la promotion et la vulgarisation des biodigesteurs. C'est de cet engagement qu'est né le programme ABPP (*African Biogas Partnership Programme*), fruit d'un partenariat public/privé entre la DGIS et deux organisations de la société civile néerlandaise, *Humanist Institute for Development Cooperation* (HIVOS) et SNV. Le but d'ABPP était de soutenir la construction de 70500 biodigesteurs dans six pays d'Afrique (Burkina Faso, Éthiopie, Kenya, Ouganda, Sénégal et Tanzanie) pour la période 2009-2013, en vue de stimuler la naissance et le développement d'un secteur marchand commercialement viable de construction de biodigesteurs (Sama & Tiabiri Thiombiano, 2012). La construction des digesteurs a dû nécessiter des adaptations technologiques que nous allons découvrir.

- **Les digesteurs rwandais**

Le gouvernement rwandais a lancé différentes initiatives visant à trouver des solutions à long terme à la pénurie d'énergie que rencontrait le pays. Parmi les solutions proposées, le biogaz a été identifié comme l'un des secteurs à développer. Afin de mener à bien le projet sur le biogaz, le gouvernement a fait appel à un expert népalais en biogaz, le Dr Amrit B. Karki, consultant de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), pour la conception de biodigesteurs adaptés aux réalités du pays. En 1982, deux biodigesteurs de 8 m³ et 20 m³ ont été installés au Centre national du petit élevage à Kabuye (Kigali) pour expérimentation. La conception de ces biodigesteurs était inspirée des modèles chinois à dôme fixe (figure 16) (Karki et al., 2015). Ils ont été testés avec du fumier de volailles, de porcs et des excréments de lapins.



Figure 16: Digesteur rwandais de type chinois (Rwigema, 2015)

D'autres modèles de bioréacteurs ont été confectionnés et adaptés à différentes localités par diverses compagnies telles que la compagnie *Kenyan Biogas International Ltd* (BIL) et la compagnie rwandaise DRIMEX Ltd.

- Le modèle Fiberglass biodigester (figure 17) a été installé dans le district de Kayonza (Rwanda) où les sols sont mous, saturés en eau ou instables (Rwigema, 2015). C'est un système à dôme fixe préfabriqué comprenant deux parties séparées, un dôme supérieur avec la chambre d'entrée et de sortie et un dôme inférieur. Sa particularité est qu'il est facilement transportable et assemblable lors de l'installation. Également, des cuves faites en fibre de verre pour le stockage sont ajoutées.



Figure 17: Fiberglass biodigester (Rwigema, 2015)

- Le modèle Flex bag biodigester (figure 18) a été installé dans le district de Kirehe (Rwanda). C'est un système composé d'un sac de digestion en plastique renforcé, logé dans un tunnel en serre, qui sert d'abri et de protection. Le tunnel agit comme un manteau d'isolant, piégeant ainsi la chaleur de la journée et maintenant la température du système entre 25 et 36 °C. Le système se réchauffe rapidement au soleil et le sac se dilate au fur et à mesure qu'il y a production de gaz. Le gaz est canalisé vers la cuisine par un tuyau en PVC (Rwigema, 2015).



Figure 18: Flex bag biodigester (Rwigema, 2015)

- **Les digesteurs kenyans**

Avec 80 % de la population vivant en zone rurale, le secteur agricole constitue le pilier de l'économie du Kenya. L'énergie de la biomasse représente environ 77 % de l'énergie totale consommée pour les besoins de cuisson et de chauffage. Le biogaz a été adopté afin de pallier les difficultés énergétiques du pays. Le premier biodigesteur au Kenya a été construit par la compagnie Tim Hutchinson en 1957 pour alimenter sa ferme de café en gaz et en engrais. La compagnie a ensuite produit d'autres unités pour la commercialisation. Entre 1960 et 1986, elle a vendu plus de 130 petites unités de biogaz et 30 grandes unités dans tout le pays. Dans la fin des années 1980, le ministère de l'Énergie, en collaboration avec l'organisation allemande de développement, a entrepris un vaste programme de promotion du biogaz nommé Programme spécial d'énergie (PSE). Ayant choisi le modèle de type indien (figure 19) le programme, au cours de son mandat, a réussi à installer environ 400 unités de biogaz (Karki et al., 2015). Toutefois, avec les activités promotionnelles et de formation des maçons, le secteur marchand des biodigesteurs s'est agrandi. Il fait intervenir désormais des entrepreneurs privés dans la construction des digesteurs sur une base individuelle. Au cours des dernières années, un certain nombre de modèles de biodigesteurs ont été introduits sur le marché, par exemple comme ceux de la compagnie BIL évoquée précédemment. En 2009, on estimait à 2 000 le nombre d'unités installées au total (Karki et al., 2015).



Figure 19: Digesteur kenyan à dôme flottant en plastique (Karki et al., 2015)

- **Les digesteurs sénégalais**

D'après les études de l'Office national de l'assainissement du Sénégal (ONAS), le taux d'accès à l'assainissement à Dakar serait de 82 %, soit 2 250 000 habitants. Parmi cette population, 31 % a accès au réseau collectif, 3,5 % au réseau semi-collectif et 47,5% à l'assainissement autonome. Cela représente un potentiel en matière organique pouvant être valorisé à différentes fins, notamment pour la production de biogaz. Sur cette base, l'État sénégalais a décidé d'intégrer la production du biogaz dans son Programme de structuration du marché des boues de vidange (PSMBV) qui vise à améliorer l'accès des populations démunies à la vidange mécanisée offerte par l'ONAS (Office National de l'Assainissement du Sénégal, 2013). La mise en œuvre de ce programme implique plusieurs acteurs, dont celui du Programme national biogaz Sénégal (PNB-SN) qui a la fonction d'introduire le biogaz en milieu rural et péri-urbain. En matière de technologies utilisées pour la production du biogaz, le Sénégal investit dans des unités de biogaz industrielles et domestiques. L'inventaire des technologies de biogaz donne ce qui suit :

- Les digesteurs domestiques du PNB-SN sont des modèles typiquement asiatiques, soit le digesteur à dôme flottant et le digesteur à dôme fixe. Il faut noter qu'au Sénégal, l'arrivée des digesteurs à biogaz a débuté très tôt, soit depuis les années 1977 avec la construction de deux biodigesteurs de type indien par la CARITAS à Ndiouck dans l'arrondissement de Thiadiaye. Après cela, l'engouement s'est freiné jusqu'au démarrage du Programme national de biogaz domestique en décembre 2009. De juin 2010 à d'août 2012, le PNB-SN rapporte avoir installé près de 350 biodigesteurs, dont 95 % en milieu rural et le reste en zones péri-urbaines (Office National de l'Assainissement du Sénégal, 2013).
- Les digesteurs industriels sont entre autres le digesteur à ballon ou bache, le digesteur Transpaille et le digesteur à boue activée de première génération. Le digesteur à bache est formé d'une fosse d'une dimension de 36 m x 36 m et d'une profondeur de 2,75 m (figure 20), lui conférant une capacité de 4 000 m³. Le système de chauffage est assuré par des tuyaux en plastique placés au fond de la fosse. La fermentation se fait en mode mésophile entre 25 et 40 °C avec alimentation en continu avec des déchets collectés à l'abattoir. Le mélange du substrat est assuré par deux mélangeurs submersibles (Office National de l'Assainissement du Sénégal, 2013).



Figure 20: Digesteur à bâche de SOGAS Dakar (Office national de l'assainissement du Sénégal, 2013)

La technologie de biométhanisation a mis du temps à être développée et maîtrisée dû aux exigences de mise en œuvre (environnement anaérobie, équilibre adéquat entre les microorganismes et les conditions physico-chimiques). Au regard des grandes avancées dans le domaine, la technologie de production de biogaz est désormais une voie de développement que beaucoup de pays, dont le Burkina Faso, ont pris en considération.

Partie II

Le biodigesteur au Burkina Faso

I. Contexte social et économique du Burkina Faso

La situation socio-économique du Burkina Faso est en continuelle croissance depuis son indépendance. Cette croissance s'accompagne d'une faible évolution du Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant (2,3 %) et d'une persistance de la pauvreté d'après l'analyse des indicateurs de pauvreté monétaire (Gouvernement Burkina Faso, 2016). En 2014, on estimait à 40,1 % la fraction de la population vivant en dessous du seuil de la pauvreté (soit 153 530 F CFA ~ 342 \$ CAD par an), comparativement à 46,7 % en 2009 (avec pour seuil estimé à 108 454 FCFA soit ~ 241\$ CAD). Cette faible croissance interpelle donc l'efficacité des politiques de développement mises en œuvre (Gouvernement Burkina Faso, 2016) et montre que les politiques de développement national ont été insuffisantes pour instaurer les dynamiques de création de richesses nécessaires à l'amélioration du bien-être des Burkinabés. Ainsi, en vue de pallier cette situation et poser les bases d'un développement économique et social durable, le gouvernement a élaboré des mesures et des plans de développement durable dont :

- Le Plan national de développement économique et social (PNDES) ;
- La politique sectorielle de l'énergie ;
- Le Plan d'Action Nationale des Énergies Renouvelables (PANER).

Ces mesures visent à redynamiser l'économie par une meilleure planification et un meilleur suivi-évaluation des plans de développement du programme présidentiel.

1. Le cadre politique du secteur de l'énergie

L'environnement énergétique du Burkina Faso est caractérisé par (Kabore, 2013) :

- (i) une prédominance de l'utilisation des énergies de la biomasse ;
- (ii) une dépendance du pays vis-à-vis des énergies fossiles ;
- (iii) un faible et inéquitable accès aux énergies modernes ;
- (iv) une très faible valorisation des énergies renouvelables endogènes.

Par ailleurs, vu le développement des activités économiques et la croissance démographique, le pays fait face à une forte demande en énergie et à une hausse de son coût d'approvisionnement. Cela limite fortement l'accès aux sources d'énergie moderne pour une grande majorité des ménages.

En vue d'assurer un accès aux énergies modernes et favoriser la compétitivité de l'économie, le Burkina Faso a entrepris, depuis l'année 2000, des réformes dans le secteur de l'énergie.

Ces réformes visaient à :

- (i) renforcer les capacités institutionnelles nationales ;
- (ii) libéraliser le sous-secteur de l'électricité ;
- (iii) maîtriser les coûts des intrants énergétiques ;
- (iv) assurer une meilleure couverture énergétique du pays, particulièrement dans les zones rurales;
- (v) faire la promotion des sources d'énergie alternatives, et plus spécifiquement des énergies renouvelables ;
- (vi) sensibiliser les populations à une utilisation rationnelle de l'énergie ;
- (vii) sécuriser les ressources énergétiques ligneuses par le développement de programmes de gestion durable et participative des forêts (Kabore, 2013).

Un décret du ministère responsable de l'énergie n°2013-104/PRES/PM/SGGCM du 07 mars 2013 portant attributions des membres du Gouvernement identifie la mission du secteur de l'énergie comme suit :

- l'élaboration et l'application de la législation et de la réglementation en matière de recherche, de production, d'approvisionnement et de distribution des produits énergétiques en relation avec les ministères compétents ;
- la création, l'équipement et le contrôle des infrastructures énergétiques ;
- le contrôle de la production, de l'approvisionnement et de la distribution des énergies conventionnelles en relation avec les ministères compétents ;
- la promotion des énergies nouvelles et renouvelables ;
- la promotion des économies d'énergies.

2. Le cadre législatif et réglementaire du secteur de l'énergie

a. Le secteur de l'énergie électrique

La production de l'énergie électrique a été libéralisée dans l'ensemble du sous-secteur tandis que le transport et la distribution de l'électricité relèvent du monopole accordé à la Société Nationale d'Électricité du Burkina (SONABEL) sous le contrôle de l'Autorité de régulation du sous-secteur de l'électricité (ARSE) (Kabore, 2013).

b. Le secteur des hydrocarbures

Le secteur des hydrocarbures du pays est caractérisé par une importante activité d'importation, de stockage, de transport et de distribution des produits pétroliers liquides et gazeux. Il est organisé sous la supervision et la gestion de trois types d'acteurs importants, dont les rôles se complètent. Il s'agit (Kabore, 2013):

(i) des ministères et institutions chargés de jouer le rôle régalien de l'État dans la réglementation et la régulation du sous-secteur ;

(ii) des établissements spécialisés dans l'appui à la mise en œuvre de la politique du Gouvernement relative au sous-secteur ;

(iii) des opérateurs privés qui exercent leurs activités conformément à la réglementation en vigueur.

L'application des règles a conduit à scinder en deux le secteur. Ainsi, les activités d'importation et de stockage relèvent du monopole de la Société nationale burkinabé d'hydrocarbures (SONABHY) et celles de transport et de distribution sont ouvertes à la concurrence.

La Direction des Hydrocarbures du Ministère responsable de l'énergie assure l'élaboration et la mise en œuvre des stratégies d'approvisionnement du pays en produits pétroliers, le contrôle des infrastructures liées à l'approvisionnement, au stockage et à la distribution des hydrocarbures, l'élaboration et le suivi de la réglementation en matière de transport, de stockage et de distribution d'hydrocarbures et de lubrifiants (Kabore, 2013).

c. Le secteur des énergies renouvelables

La question de l'accès à l'énergie demeure une problématique assez importante pour les ménages et les entreprises au Burkina Faso. Les capacités à offrir de l'électricité restent insuffisantes pour l'ensemble de la demande. Des efforts et mesures sont consentis afin de développer et faciliter l'accès et l'utilisation de l'énergie renouvelable. On peut retenir entre autres des règlements qui statuent sur (Kabore, 2013):

- l'instauration de rencontres biennales internationales sur les biocarburants et sur le solaire;
- l'exonération sur cinq ans du droit de douane et de la TVA des équipements d'énergie solaire à partir de la Loi de finances 2013 ;
- le renforcement des capacités de l'Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (IRSAT) pour la certification des foyers améliorés et des équipements solaires ;

- la diffusion de 5 000 foyers améliorés ;
- la promotion des énergies de substitution (gaz butane, brique) au bois-énergie ;
- le renforcement des capacités des producteurs d'équipements d'énergies domestiques ;
- la création de marchés ruraux de bois-énergie.

Pour ce qui est de la promotion des énergies de substitution, le pays présente des opportunités intéressantes. On peut souligner le fort potentiel de l'énergie solaire (ensoleillement) et des biocarburants qui suscitent un intérêt de la part du secteur privé, des Organisations Non-Gouvernementales (ONG) et d'autres partenaires. L'hydro-électricité est en continuel développement avec un potentiel de production annuelle estimé actuellement à 166 GWh (Kabore, 2013). Dans le domaine des énergies domestiques, on peut relever l'existence d'un fort potentiel de biomasse (résidus agricoles : tiges de coton, etc.) estimé à 2 515 millions de m³ pouvant servir à la substitution du bois-énergie avec la technologie du biodigester pour la production de biogaz.

II. La technologie des biodigesteurs au Burkina Faso

1. La filière biogaz au Burkina Faso

La production de biogaz constitue une priorité politique pour le pays depuis 2009. En effet, le biogaz produit à partir des déjections animales constitue une solution aux problèmes liés à l'accès limité des services énergétiques modernes en milieu rural et péri-urbain. Afin de répondre aux préoccupations des populations des zones rurales, à savoir l'insécurité alimentaire et énergétique, le gouvernement a lancé depuis 2010 une campagne de promotion du biogaz à travers le Programme national de Biodigester (PNB). Ainsi donc, le PNB, à travers ses actions de vulgarisation de la technologie du biodigester, apporte une approche différente dans le processus de développement des zones rurales et aussi dans la transition énergétique et environnementale du pays. L'objectif est de mettre en place, auprès de la population rurale, une nouvelle orientation pour la production autonome d'énergie, des techniques de valorisation des matières organiques et une diversification des sources de fertilisants biologiques, tout en permettant la réduction de l'utilisation des matières premières fossiles pour les besoins énergétiques. La technologie du biodigester offre donc différents avantages pour les ménages, y compris une amélioration des conditions de vie des femmes et de la famille et le développement de l'agriculture.

2. Le potentiel du biogaz

Le potentiel du biogaz est énorme pour les ménages ruraux. L'aménagement d'un biodigester au sein d'un ménage permet de répondre aux besoins de cuisine et d'éclairage de la famille. Cet apport énergétique fourni par le biodigester permet de réduire la charge de travail des femmes et des enfants au cours de la journée, à savoir les corvées de collecte et de transport du bois, l'entretien du feu et le lavage des ustensiles de cuisine souillés par la suie et la fumée (Karki, Nakarmi, Dhital, & Sharma, 2015; Sénégal, 2013). Ces tâches peuvent prendre 2 à 3 heures par jour par ménage voire même plus dépendamment de la grandeur du ménage. Le biodigester est donc un bien utile qui permet d'économiser du temps au profit d'autres activités de la maison et d'une meilleure gestion du ménage. La production du biogaz génère et développe aussi des secteurs d'emplois au sein de la société rurale. Les producteurs agricoles utilisant le biogaz sont pleinement avantagés, car l'usage du biodigester les stimule à adopter une nouvelle forme de pratique d'élevage qui est la stabulation des animaux. De plus, l'utilisation du biogaz leur permet de créer une plus-value à partir des déjections animales par la production de fumures organiques rendues par le biodigester après la production de biogaz.

III. L'adoption et la vulgarisation des biodigesteurs dans la région de la Boucle du Mouhoun au Burkina Faso

Après avoir prouvé ses capacités novatrices dans différents pays, la technologie du biodigesteur est bien accueillie au Burkina Faso, notamment dans la région de la Boucle du Mouhoun. L'Union des groupements pour la commercialisation des produits agricoles de la Boucle du Mouhoun (UGCPA-BM) est l'organisation non gouvernementale dans la région qui a lancé et fait la promotion de la technologie du biodigesteur auprès de la population paysanne. Elle a été créée en 1993 et œuvre à l'amélioration des conditions de vie des populations paysannes de la région. Son activité principale est la commercialisation collective des excédents céréaliers (maïs, sorgho, petit mil, fonio, haricot, sésame, bissap biologique) de ses membres. À ce jour, l'UGCPA compte 3000 membres, soit 1650 producteurs et 1350 productrices issus de 169 groupements de base (91 groupements masculins et 78 groupements féminins). Ces groupements s'étendent dans les six provinces de la région de la Boucle du Mouhoun.

Le Projet Résilience climatique dans la Boucle du Mouhoun (PRCBM), lancé en 2013 par l'UGCPA, a permis d'innover dans les services offerts aux membres. L'un des services qui a connu un grand engouement est celui de l'énergie renouvelable. En effet, un nouveau produit a été introduit auprès de la population de la Boucle du Mouhoun. Il s'agit de la technologie du biodigesteur destiné à la production de biogaz. Les bénéficiaires de la technologie sont les producteurs agricoles (Anonyme, 2013) qui répondent à certains critères d'éligibilité:

- Être membre d'une exploitation en règle vis-à-vis de l'UGCPA/BM ;
- Pour les hommes, être âgés de 37 ans ou moins ;
- Avoir accès à un minimum de 0,5 ha de terre pour la culture du niébé ;
- Détenir au moins 4 têtes de bœufs ;
- Adopter l'itinéraire technique recommandé pour l'élevage en enclos ;
- Participer activement aux activités de sensibilisation et de formation ;
- S'engager à respecter les termes du contrat d'engagement à savoir :
 - Rembourser 70 % de la valeur des intrants reçus pour la culture du niébé au moment de la livraison de la production ;
 - Rembourser sur 3 ans 70 % de la valeur des animaux et des enclos reçus;
 - Rembourser sur 3 ans 30 %, pour les femmes, et 50 %, pour les hommes, de la valeur de la subvention reçue du PRCBN pour l'installation du biodigesteur.

Pour les femmes, les conditions d'attribution du biodigester ont été plus avantageuses que pour les hommes afin d'inciter et encourager leur implication dans le programme.

1. L'étude évaluative en milieu rural

Objectif de l'étude

L'objectif de la présente étude est d'établir une base de référence sur l'adoption et l'utilisation du biogaz par le biais de la technologie du biodigester dans les zones rurales, précisément dans la région de la Boucle du Mouhoun. L'étude vise en particulier à collecter des informations essentielles auprès de la population afin d'analyser et de comprendre leurs perceptions et leurs attentes.

Pour ce faire, l'étude comportait les objectifs spécifiques suivants :

- Identifier les raisons qui motivent l'utilisation des biodigesteurs ainsi que les contraintes qui nuisent à une telle utilisation ;
- Analyser les moyens possibles d'amélioration de la technologie ;
- Formuler des recommandations d'utilisation de la technologie adaptées au contexte et aux besoins de la population.

2. La démarche méthodologique

a. L'élaboration des outils dans la collecte d'informations

Un questionnaire d'entretien a été élaboré à l'intention des membres bénéficiaires et non bénéficiaires de la technologie. Ce guide d'entretien a permis d'orienter les rencontres et a servi d'appui à la collecte des données. Parmi les thèmes abordés dans les questionnaires, on peut mentionner les points suivants :

- Les caractéristiques de la famille du bénéficiaire ;
- La méthodologie et les outils appliqués dans l'utilisation du biodigester ;
- Les raisons d'adoption de la technologie ;
- La perception et le taux de satisfaction du bénéficiaire vis-à-vis du biodigester ;
- Les attentes et les recommandations des bénéficiaires.

b. La zone d'étude et l'échantillon

L'étude a été réalisée dans la région de la Boucle du Mouhoun (Figure 21). La zone d'étude se limite au cercle d'action de l'UGCPA et les villages d'intervention ont été sélectionnés selon le niveau de pénétration de la technologie. En se référant à la liste des bénéficiaires de l'UGCPA, un échantillon de participants, selon leur localité, a pu être fait (Tableau 2).

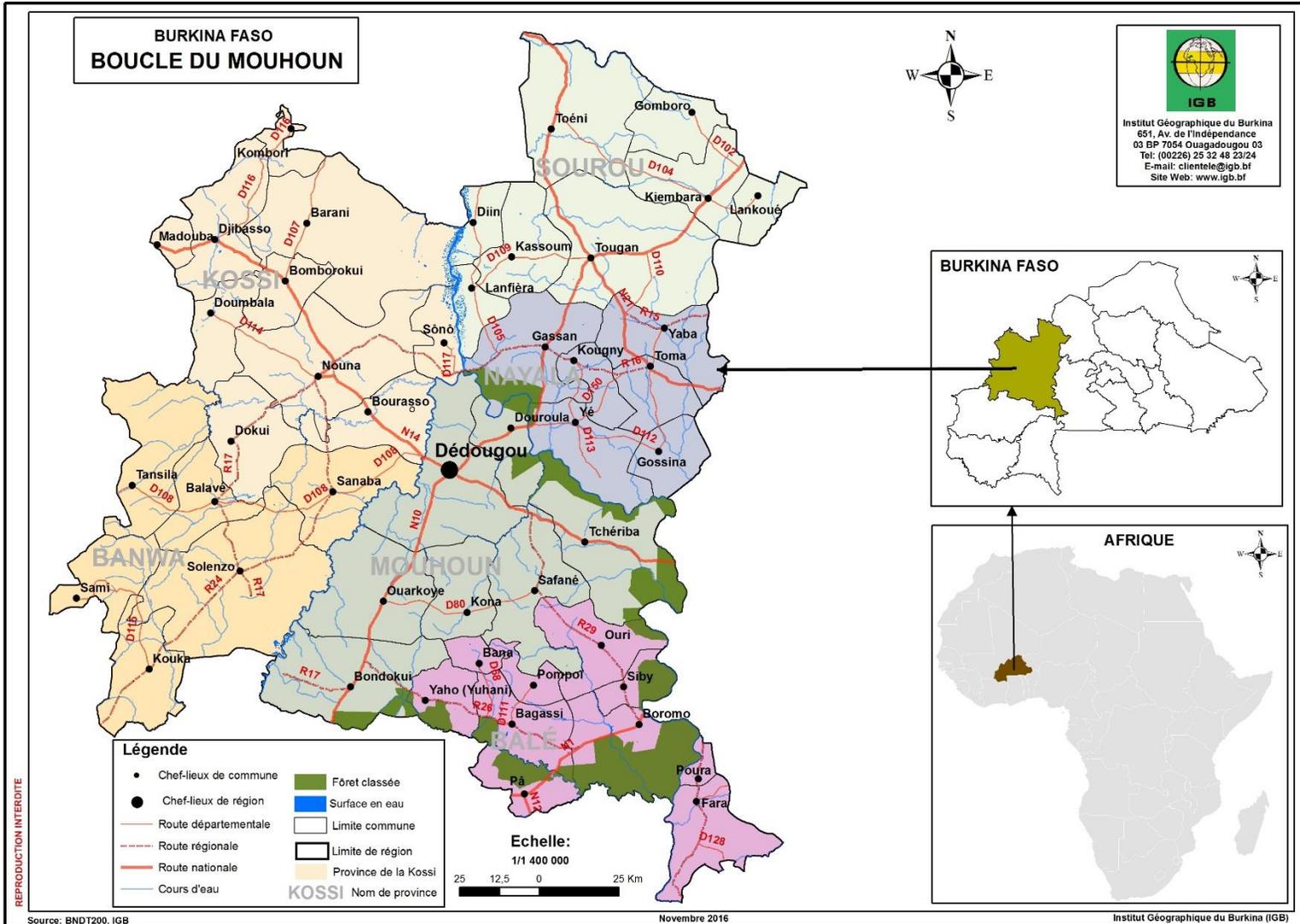


Figure 21: Carte géographique de la Boucle du Mouhoun – Burkina Faso (Institut Géographique du Burkina, 2016)

c. Rencontres et entretiens

Les rencontres avec les membres bénéficiaires et non bénéficiaires ont été organisées avec les responsables, les animateurs et animatrices et les leaders des différents groupements de chaque village concerné. Les questionnaires ont été répartis en trois catégories d'entretiens :

- Un questionnaire a été administré à 9 groupes de discussion (*focus group*) constitués de bénéficiaires de biodigesteurs. L’entrevue a été effectuée auprès de groupes de six à huit personnes ayant adopté et utilisé la technologie (qu’elle soit fonctionnelle ou non). Le but de cet entretien collectif était de permettre aux participants de partager leur expérience d’utilisation du biodigesteur pour connaître l’avis de tous sur la technologie et leur niveau de satisfaction et, aussi, pour cerner les différents besoins de l’ensemble des utilisateurs. Ces entrevues ont ainsi permis de cibler les attentes et les préoccupations des bénéficiaires. Une liste des éléments essentiels de ces rencontres a ensuite été produite et soumise au jugement appréciatif d’autres utilisateurs, et ce, de façon individuelle (voir le point suivant).



- Un autre questionnaire a été administré individuellement à 30 autres bénéficiaires (sélectionnés hors des bénéficiaires des *focus group*) dans le cadre d’entrevues semi-dirigées. Ces entrevues, administrées auprès des personnes disposant de la technologie, avaient pour objectif de dresser le profil des utilisateurs, de leurs besoins et de leurs perceptions sur le biodigesteur.



- Un nouveau questionnaire a été administré à un *focus group* constitué de non-bénéficiaires de la technologie. L’entretien a été effectué avec 8 groupes, chaque groupe étant constitué de 2 à 4 personnes non-bénéficiaires de la technologie. Le but était d’évaluer la perception

de la technologie chez ces personnes, les raisons de leur non-adoption et le niveau d'intérêt accordé à la technologie.

Les questionnaires ont été administrés aux différents groupes, indépendamment les uns des autres de manière à ne pas biaiser les réponses. Chaque fois, l'étudiant-chercheur allait à la rencontre des paysans accompagné d'un animateur ou d'une animatrice de zone. L'administration du questionnaire était réalisée après une explication détaillée des objectifs de l'étude et l'obtention de leur consentement.

Tableau 2: Échantillon de l'étude

| Province | Nombre de bénéficiaires | Commune | Nombre de bénéficiaires | Village | Nombre de bénéficiaires | Nombre de participants du groupe de discussion (bénéficiaires) | Nombre de participants du groupe de discussion (non bénéficiaires) | Nombre d'entretiens individuels |
|----------|-------------------------|------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--|--|---------------------------------|
| Banwa | 112 | Solenzo | 56 | Masso | 24 | 8 | 4 | 0 |
| Banwa | | Solenzo | | Dinkoro | 5 | 0 | 0 | 2 |
| Banwa | | Tansila | 22 | Tansila | 15 | 7 | 2 | 0 |
| Banwa | | Sami | 17 | Sogodjankoli | 16 | 0 | 0 | 5 |
| Banwa | | Sanaba | 17 | Dio | 10 | 7 | 4 | 0 |
| Banwa | | | | Sanaba | 5 | 0 | 0 | 3 |
| Kossi | 28 | Nouna | 12 | Varé | 6 | 8 | 0 | 0 |
| Kossi | | | | Konankaira | 5 | 0 | 4 | 4 |
| Kossi | | Doumbala | 9 | Konkuykoro | 6 | 5 | 4 | 0 |
| Kossi | | | | St Martin | 3 | 0 | 0 | 1 |
| Kossi | | Bomborokuy | 7 | Bomborokuy | 7 | 6 | 4 | 3 |
| Mouhoun | 60 | Bondoukuy | 18 | Sara | 6 | 5 | 4 | 0 |
| Mouhoun | | | | Kèra | 3 | 0 | 0 | 1 |
| Mouhoun | | Ouarkoye | 25 | Sokongo | 16 | 5 | 3 | 0 |
| Mouhoun | | | | Kosso | 9 | 0 | 0 | 5 |
| Mouhoun | | Dédougou | 17 | Boron | 8 | 6 | 0 | 1 |
| Mouhoun | | | | Soukuy | 2 | 0 | | 2 |
| Mouhoun | | | | Kari | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Mouhoun | | | | Ouetina | 2 | 0 | 0 | 2 |
| | 200 | | 200 | | 149* | 57 | 29 | 30 |

* 51 bénéficiaires appartiennent à d'autres villages pour lesquels nous n'avons pas pu avoir les données

d. Analyse des données

Les données collectées ont été traitées par une analyse de contenu avec le logiciel Excel de Windows selon les diverses catégories suivantes : les avantages, les problèmes, les motifs d'adoption, les niveaux de satisfaction, les recommandations, etc. Le calcul des moyennes et des pourcentages de réponses a permis de faire une analyse numérique des données.

IV. Analyse et discussion des résultats de l'enquête

1. La perception des biodigesteurs par les bénéficiaires et la population

Les biodigesteurs suscitaient déjà une certaine curiosité pour les producteurs de l'UGCPA. En effet, certains producteurs disposaient d'un biodigesteur qu'ils s'étaient procuré eux-mêmes ou par le biais de structures donatrices (ONEA, SN CITEC). L'arrivée du projet PRCBM avec le service biodigesteur a davantage conquis la curiosité de la population. Le service a été le bienvenu, car il permettait de rendre la technologie plus accessible. Lors des entretiens avec la population, nous avons observé auprès d'eux une réjouissance de faire partie des personnes admissibles à bénéficier de la technologie.

Comme cela était indiqué dans le partenariat noué entre l'UGCPA et le Conseil régional de la Boucle du Mouhoun, le PNB avait la charge d'assurer l'encadrement des ménages bénéficiaires. Le plan de vulgarisation consistait à sensibiliser des bénéficiaires aux avantages du biodigesteur, à effectuer la démonstration terrain de l'utilisation de la technologie et à animer des ateliers de rencontres et de discussions sur la technologie avec les membres bénéficiaires de l'UGCPA (Régional & UGCPA-BM, 2013).

À la sortie des rencontres, les producteurs se réjouissaient du nouveau service qui serait prochainement disponible. Les attentes concernaient principalement la fumure organique dont ils allaient disposer pour la production agricole, l'éclairage qui permettrait notamment d'appuyer les études des enfants et le gaz pour faciliter la cuisine. Certains des producteurs ont préféré inscrire le nom de leur femme afin qu'elle adhère au programme et bénéficie des avantages conférés aux femmes.

2. Les besoins de la famille

Les résultats de l'enquête révèlent que la taille moyenne d'un ménage est de 16,1 personnes parmi lesquelles on peut compter en moyenne 10 adultes en âge de travailler et 6,1 enfants. Vu le nombre important de personnes dans un ménage, on évalue qu'un biodigesteur de 6 m³ (modèle de base) est le plus adéquat pour répondre aux besoins énergétiques de la famille. Le biodigesteur de 6 m³, une fois en bonne fonctionnalité, peut fournir d'après les données du PNB une quantité de 24 000 L de biogaz par année (Sandwidi, 2016), ce qui peut assurer au quotidien une cuisson de 4 heures et un éclairage de plus de 6 heures. Le biodigesteur de 6 m³ fut le modèle de préférence adopté par l'UGCPA pour ses bénéficiaires.

La majorité des bénéficiaires sont de petits et moyens producteurs disposant de plus de 1,5 ha de terre cultivable. Afin d'augmenter leurs rendements agricoles, ils ont recours à l'utilisation d'engrais et de compost. Le biodigesteur a le potentiel d'offrir de la fumure organique de qualité, appelée digestat une fois le processus de méthanisation terminé. Ce digestat est considéré de qualité, car, à travers le procédé de bioconversion (qui associe activité organique et digestion anaérobie), il favorise la conversion de l'azote organique en azote ammoniacal (Agrinova, Martel, & Desmeules, 2013). De plus, ce procédé de dégradation permet de réduire le taux de matière sèche et la viscosité du digestat, ce qui facilite son infiltration dans le sol lors de l'épandage.

Le sondage effectué auprès des utilisateurs du biodigesteur montre que les répondants sont unanimes à estimer que le digestat est un excellent engrais pour les cultures ; 100 % des producteurs interrogés l'épandent dans leur champ. Cela témoigne de l'intérêt du biodigesteur pour combler les besoins de la famille, notamment en ce qui a trait à sa production alimentaire.

3. Les motifs d'installation du biodigesteur

Comme on vient de le voir, les producteurs ont un très grand intérêt pour la fumure organique obtenue du biodigesteur : 86,6 % des personnes interrogées individuellement affirment installer le biodigesteur afin de bénéficier de digestat de qualité (Tableau 3). Cette raison est également le premier motif exprimé par les personnes enquêtées lors des entretiens *focus group*. Les 9 groupes participants ont déclaré installer la technologie pour le compost produit.

Lors des discussions en groupes, ils sont plus d'un à émettre des commentaires qui vont dans le sens suivant : « la fumure organique est non seulement de qualité supérieure comparativement aux engrais chimiques, mais elle offre également un meilleur rendement dans la production agricole ». Cette possibilité d'utiliser le digestat comme fertilisant agricole réjouit les producteurs dans la mesure où ils enregistrent des économies sur les dépenses d'engrais et sur les intrants agricoles.

En milieu rural, l'implication de la femme dans la vie du ménage se révèle beaucoup plus importante que celle de l'homme. En effet, elle a de nombreuses tâches à effectuer, à savoir aider l'homme dans les travaux champêtres, s'occuper du ménage et de la cuisine pour la famille, entretenir son petit lopin de terre ou assurer son petit commerce pour le gain de revenu pour la famille. Conscientes des charges de la femme, les personnes enquêtées révèlent que l'usage du biogaz contribue à la soulager considérablement dans ses tâches ménagères quotidiennes. La corvée du bois est abolie, rendant plus facile et plus rapide la cuisson des repas. De nombreuses personnes soulignent qu'il est plus aisé pour elles de préparer le déjeuner du matin. Cela est vraisemblablement lié au fait que 70 % des personnes interrogées individuellement affirment avoir

recours au biodigester pour le gaz pour la cuisine. Ce motif d'adoption de la technologie constitue la deuxième raison invoquée dans les enquêtes individuelles et la quatrième raison invoquée dans les *focus groups*. Comme on peut l'observer dans le tableau 3, 7 groupes sur 9 ont mentionné l'intérêt du biodigester pour le gaz.

En milieu rural, l'usage de lampes-torches alimentées avec des piles ou à l'énergie solaire et de lampes-tempête à pétrole constitue la principale source d'éclairage au crépuscule. Étant confrontés à l'absence d'électricité en zone rurale, la majorité des bénéficiaires interrogés dans le *focus group* (8/9 groupes) et 53,3 % des personnes sondées individuellement disent installer le biodigester pour bénéficier de la lumière à gaz. Nombreux sont satisfaits de cette lumière. Elle est plus efficace que les lampes-torches et offre une plus grande autonomie tout au long de la soirée, soit 6 heures d'éclairage. Ils sont nombreux à mentionner les bienfaits de cet éclairage dans l'apprentissage scolaire des enfants le soir. Il joue aussi un rôle important pour le ménage dans son ensemble, car il permet d'étendre la période pendant laquelle les tâches ménagères de la femme qui nécessitent de l'éclairage, telles que le bain des bébés, la cuisine du soir, la filature du coton, etc., peuvent être faites.

Les paysans de la Boucle du Mouhoun démontrent un grand intérêt pour la préservation et la conservation de la forêt. Ce sont 8 des 9 groupes entendus lors des échanges des *focus group* (Tableau 3) qui précisent vouloir la sauvegarde de la forêt en adoptant les biodigesteurs. Il faut souligner que lors des campagnes de vulgarisation de la technologie, un accent important a été mis sur la contribution du biogaz pour limiter l'utilisation et la coupe du bois. Les paysans sont donc conscients de l'importance de la sauvegarde des arbres et des forêts.

Par contre, ce ne sont que 3 groupes sur 9, et un très faible nombre de personnes interrogées individuellement, qui évoquent l'avantage d'installer le biodigester pour préserver la santé de la femme contre la fumée nocive du bois de chauffe. Il serait donc important de mieux informer la population sur cet aspect puisqu'il s'agit là d'un avantage notable de la technologie.

Tableau 3: Motifs invoqués par les bénéficiaires du biodigester pour expliquer pourquoi ils ont adopté la technologie

| Motifs d'installation du biodigester | | |
|---|--|--------------------------|
| Groupe de répondants | 9 groupes participants | Individuel |
| Motifs invoqués | Nombre de groupes ayant invoqué le motif | % des personnes (n = 57) |
| Fertilisants à haut rendement (fumure organique) | 9 | 86,6 |
| Lumière | 8 | 53,3 |
| Préservation de la forêt | 8 | 26,7 |
| Gaz pour la cuisine | 7 | 70 |
| Économie sur les intrants agricoles | 4 | - |
| Réduction des tâches ménagères | 3 | - |
| Santé de la femme | 3 | 3,3 |
| Alimentation animale | 2 | - |
| Stabulation du bétail | 1 | - |
| Subvention | 1 | - |

4. La fonctionnalité des biodigesteurs dans la région de la Boucle du Mouhoun

Dans la région de la Boucle du Mouhoun, il y a une grande concentration de bénéficiaires de biodigesteurs, soit 1753 unités en 2015 (Programme National de Biodigester - Burkina Faso (PNB-BF), 2016). L'enquête terrain a permis de rafraîchir les données sur l'état de fonctionnement des biodigesteurs installés en 2013 via le projet PRCVM. Les 87 personnes bénéficiaires interrogées dans les différents villages de la région ont permis d'avoir les statistiques suivantes : 32% des biodigesteurs installés sont fonctionnels et 68% sont déclarés non fonctionnels (Figure 22).

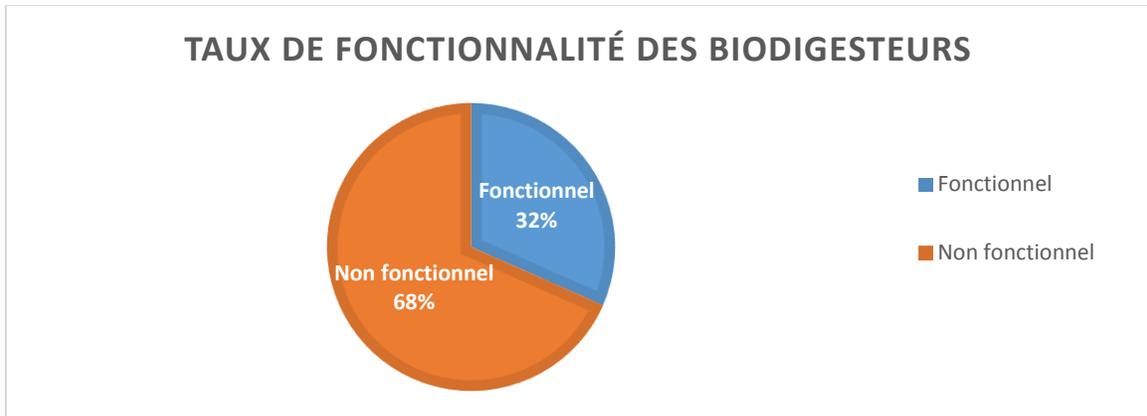


Figure 22: Taux de fonctionnalité des biodigesteurs installés via le projet PRCVM (n = 87)

On peut distinguer différents états dans la fonctionnalité des biodigesteurs. Lors de l'enquête, des bénéficiaires mentionnent avoir des biodigesteurs en bon état de fonctionnement, mais disent ne pas respecter formellement les indications de chargement recommandées. Ils sont nombreux à avoir deux lieux habitation : la résidence principale dans le village et l'habitation secondaire hors du village dans leur champ. Habituellement, c'est dans la cour principale que le biodigesteur est installé. La cour secondaire n'est utilisée que durant la saison agricole. À l'arrivée des cultures, la famille déménage dans la maison secondaire, ce qui rend plus difficile l'entretien et le chargement du biodigesteur installé dans la cour principale. La longue période d'absence occasionne un arrêt du processus de méthanisation, un assèchement de la matière et, par conséquent, la non-fonctionnalité du dispositif.

5. Le niveau de satisfaction des utilisateurs du biodigesteur

Au cours de l'enquête terrain, les répondants ont été interrogés sur leur niveau de satisfaction envers les biodigesteurs déjà installés. La question était formulée de sorte à attribuer des grades de satisfaction allant de la cote « pas satisfait » à « très satisfait ». Leurs réponses ont été prises en considération et analysées. Nous sommes arrivés aux proportions suivantes (Figure 23).

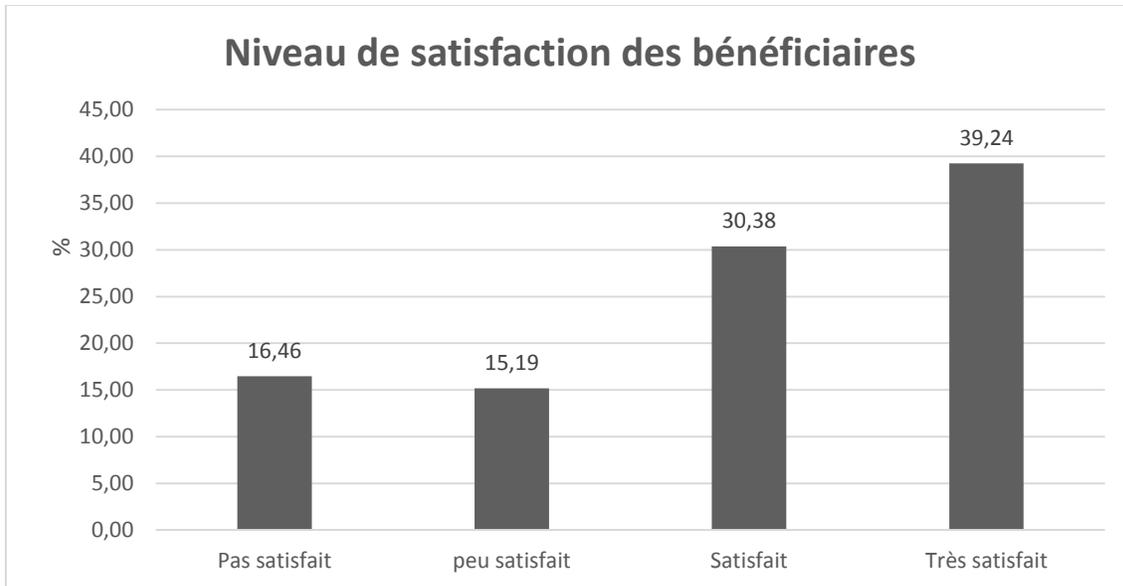


Figure 23: Niveau de satisfaction des répondants (n = 87) sur l'utilisation du biodigesteur

Sur 87 bénéficiaires interrogés, 39,24 % ont répondu être très satisfaits et 30,38 % ont répondu qu'ils étaient satisfaits. Globalement, 31,65 % des répondants s'estiment peu ou pas satisfaits. Les utilisateurs satisfaits sont en majorité ceux n'ayant pas connu de perturbations dans le processus de production du biogaz durant les premiers mois de l'installation de l'ouvrage. Ils ont pu apprécier l'apport du biogaz au ménage. Également, il faut noter que les bénéficiaires ayant donné des impressions positives apportaient plus de soin dans l'entretien quotidien du biodigesteur. Ils avaient bien assimilé les enseignements prodigués. Le reste des personnes interrogées donnait différentes raisons de leur non satisfaction envers les dispositifs telles que : le dysfonctionnement du système ou le mauvais usage de la technologie. Nous y reviendrons avec plus de précision dans la section « VI. 2 Difficultés d'utilisation du biodigesteur et problèmes rencontrés par les bénéficiaires ».

V. Contributions et impacts socio-économiques et environnementaux

1. L'apport socio-économique

Les entretiens organisés avec les producteurs bénéficiaires du biodigesteur ont permis de constater les améliorations qu'apporte l'utilisation du biogaz dans les ménages.

Du point de vue de l'amélioration des conditions des femmes (figure 24), on note qu'elles ont observé une réduction significative du temps mis pour faire la cuisine. Ainsi, par ce gain en temps, elles arrivent à s'adonner à diverses activités sociales et éducatives. L'une des femmes du village de Bomborokuy a fait le témoignage suivant : « Depuis que j'utilise le biogaz pour cuisiner, j'arrive à gagner du temps et grâce au temps libre, je suis en mesure de participer aux différentes rencontres et réunions de l'association villageoise des femmes à laquelle j'ai adhéré ». Toujours dans le village de Bomborokuy, le *focus group* des femmes a montré une bonne collaboration entre elles lors des échanges. On peut donc penser que les personnes possédant la technologie développent entre elles des points d'intérêt qui facilitent et renforcent les liens sociaux au sein du village.



Figure 24: Groupe de femmes du village de Bomborokuy

Un autre domaine où le biodigesteur semble avoir un impact très positif est l'agriculture. La fumure organique obtenue constitue un fertilisant de premier choix pour les producteurs et productrices. En effet, tous les producteurs ont noté que le digestat, une fois épandu, permet d'obtenir un meilleur rendement agricole. Un producteur du village de Boron a mentionné ceci : « Quand j'applique la fumure organique sur une portion du champ de culture, à la récolte, la différence de cette portion traitée avec la fumure organique est très frappante. La production est nettement meilleure que dans le reste du champ (...), mais, malheureusement, je ne dispose plus de cette fumure organique dû au

fait que mon biodigesteur n'est plus fonctionnel ». L'avènement du biodigesteur a permis aux producteurs d'avoir une meilleure gestion des déchets agricoles. Ils ont saisi l'intérêt de valoriser les déchets d'animaux pour la production de biogaz destiné à la famille et la production de fumure organique pour le sol.

En ce qui a trait à l'aspect socio-économique, on note que nombreux sont ceux qui s'intéressent à la production et à la commercialisation de la fumure organique provenant du biodigesteur, à l'image de ce qui se fait déjà avec de simple compost et le fumier des animaux, dont la valeur est estimée à environ 30 000 F CFA (~ 66 \$ CAD) par charrette. Ayant compris le bien-fondé du biodigesteur et ses avantages, on assiste aussi au développement d'activités dans le secteur de la maçonnerie.

Dans le domaine de l'emploi, c'est au total 434 maçons qui ont été formés et 150 qui sont restés afin d'assurer la construction des biodigesteurs et le service après-vente. Ces maçons sont répartis au sein de 14 coopératives à raison d'une coopérative par région, exception faite de la région de la Boucle du Mouhoun qui en abrite deux en raison du plus grand nombre de biodigesteurs installés (Programme National de Biodigesteur - Burkina Faso (PNB-BF), 2015). Aussi, le marché d'accessoires (lampes à biogaz, foyers, équipements de plomberie...) est assuré par des compagnies privées. La technologie du biodigesteur développe et réunit de nombreux autres acteurs (promoteurs, animateurs, clients bénéficiaires) qui assurent la promotion et le marketing de proximité de la technologie (Programme National de Biodigesteur - Burkina Faso (PNB-BF), 2015). Le PNB enregistre que l'activité des maçons a permis d'injecter au total 514 348 500 FCFA dans les campagnes, selon le rythme d'implantation des biodigesteurs, de 2010 à 2015.

2. L'évaluation des impacts environnementaux

L'utilisation optimale d'un biodigesteur de 6 m³ permet d'économiser environ une tonne de bois par an et de préserver 0,6 ha de forêt (Bambara, 2016; Programme National de Biodigesteur - Burkina Faso (PNB-BF), 2015). C'est donc une avancée majeure dans la lutte contre la déforestation. En effet, les producteurs qui disposent ou qui disposaient du biogaz affirment délaissier l'utilisation du bois de chauffe et du charbon de bois. La diffusion de la technologie dans les régions participe à la lutte contre les changements climatiques.

Le biodigesteur contribue à la réduction des émissions des gaz à effet de serre (GES). Selon le Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du Gouvernement du Québec, les projets de captation du biogaz émis par les ouvrages de stockage d'effluents d'élevage et utilisé à des fins énergétiques à la ferme (chauffage de bâtiments et de l'eau) contribuent à réduire les GES émis (Karam, 2015). En d'autres termes, l'effet général de la production et de l'utilisation de biogaz est

très bénéfique. Même si le processus de biométhanisation produit un biogaz constitué principalement de deux importants gaz à effet de serre (le dioxyde de carbone et le méthane) cette production est considérée comme neutre ou bénéfique pour l'environnement (Office National de l'Assainissement du Sénégal, 2013).

L'usage du biogaz a un impact considérable sur la qualité de l'air dans les habitations. En effet, la substitution de la combustion du bois de chauffe ou du charbon de bois par le biogaz permet de ne plus exposer les personnes les plus fragiles (femmes, enfants, vieilles personnes) aux fumées toxiques dégagées. La santé de tous les gens est ainsi préservée grâce à l'usage du biogaz.

Le recours aux énergies propres tirées de la biomasse agricole, comme le biogaz, constitue un réel avantage pour la qualité de vie, la santé et les finances des ménages.

VI. Analyse et diagnostic des problèmes rencontrés dans l'utilisation des biodigesteurs

Les biodigesteurs vulgarisés en milieu rural sont de type traditionnel et mécanique. Leur utilisation demande un certain effort physique, un suivi, et une rigueur dans le travail d'entretien. Les modèles de biodigesteurs installés par le PNB (le GGC 2047 à 6 m³, le Fasobio15 à 4 m³) sont des ouvrages simples à manipuler, mais demandent un minimum de connaissances d'utilisation (Figure 25).



Figure 25: Biodigesteur modèle GGC 2047 du PNB (photo : SIDWAYA 2015)

1. Les bonnes pratiques et méthodes d'utilisation des biodigesteurs

L'utilisation du biodigesteur s'accompagne d'une certaine rigueur dans les tâches. Construit avec des cubes de briques et du matériel local, le biodigesteur a une capacité de 6 m³ ou 4 m³. L'utilisation du biodigesteur débute par un premier remplissage. Cela demande une importante quantité de bouse de vache fraîche ou de crottins de porc (au moins une tonne). Il en est de même pour l'eau de mélange. Ces deux éléments doivent d'abord être bien délayés et mélangés de façon à obtenir une composition homogène. Le mélange obtenu est introduit dans le digesteur afin de permettre le processus de méthanisation. Selon les normes indiquées par le PNB, le temps de rétention ou de séjour est de 3 à 4 semaines dépendamment de la qualité de la bouse de vache. Les biodigesteurs vulgarisés par le PNB sont des modèles à chargement continu. La demande en chargement quotidien est évaluée à 20 kg de déjections de bœuf et 20 litres d'eau (Sandwidi, 2016). Ce chargement quotidien est essentiel pour assurer l'alimentation en matière organique dégradable

et en bactéries utiles, ainsi que le bon déroulement du processus de production de biogaz et l'évacuation du digestat.

Outre le chargement quotidien de déjections animales, le biodigester demande un certain entretien périodique. Le vidage complet et périodique de la fosse à effluent est nécessaire pour permettre l'écoulement du digestat. La digestion s'effectue en milieu anaérobie. Il est essentiel d'assurer l'étanchéité du biodigester et de son réseau de plomberie en vérifiant leur usure. Comme l'équipement est exposé à l'air et au soleil, son usure est plus prononcée. Il est important d'effectuer des travaux d'entretien et le changement des pièces usées au besoin. Des situations de bourrage ou d'accumulation de déjections non décomposées peuvent être rencontrées avec le biodigester. Cela cause l'arrêt du processus de méthanisation et d'écoulement du digestat. Il est important d'effectuer un contrôle hebdomadaire de la viscosité du mélange au niveau du bassin de sortie à l'aide d'un bâton de bois. Lors d'un assèchement ou de la formation de croûtes dans la fosse, une vidange complète du biodigester est nécessaire.

Pour des questions de sécurité, les vannes d'alimentation du biogaz doivent être ouvertes et refermées après chaque usage du gaz.

2. Les difficultés d'utilisation du biodigester et les problèmes rencontrés par les bénéficiaires

Le biodigester est une technologie dont le fonctionnement et l'utilisation demandent un certain engagement de la part du bénéficiaire. Comme on l'a vu dans le point précédent, l'entretien de l'outil et son chargement quotidien relèvent de la responsabilité du bénéficiaire. Il est donc essentiel qu'il sache utiliser et entretenir le biodigester.

L'enquête effectuée auprès des bénéficiaires a permis de sonder le niveau d'implication des bénéficiaires et leur compréhension de la technologie.

a. La limite scolaire des bénéficiaires

La barrière scolaire constitue un obstacle à l'utilisation du biodigester. Il ressort de l'enquête que la moyenne d'âge des propriétaires du biodigester est de 48,13 ans. Cette tranche d'âge correspond aux personnes nées dans la période d'indépendance du pays en 1960. À cette époque, en 1970, le taux brut de scolarisation était encore très faible, soit 11%, et en 1980 il n'était encore que de 15,8% (Pilon, 2005). Cela vient expliquer en partie le faible niveau de scolarité des personnes interrogées. On retient que 60 % des propriétaires interrogés individuellement (figure 26) n'ont reçu qu'un enseignement primaire, 10 % ont un niveau secondaire et 30 % n'ont reçu aucune scolarisation.

Les statistiques sont aussi similaires lorsqu'on interroge les autres membres du ménage sur leur niveau de scolarité. La majorité des enfants scolarisés sont d'un niveau primaire ou secondaire. Le niveau de scolarité est considéré comme un paramètre important pour l'utilisation du biogaz. Un niveau de scolarité avancé contribue à une meilleure compréhension des avantages du biogaz, à l'entretien du dispositif et à l'application des consignes pour une bonne utilisation du biodigester. En effet, on a constaté chez les personnes qui savaient s'exprimer en français et celles ayant un niveau de scolarité secondaire qu'elles démontraient une meilleure connaissance dans l'utilisation du biodigester. Un bénéficiaire de 64 ans qui a une scolarité de niveau primaire dans le village de Kari témoigne en français que depuis l'acquisition du biodigester il y a 3 ans, il s'efforce tout seul d'assurer l'alimentation de son digesteur tous les jours au petit matin, ceci afin qu'il demeure fonctionnel. Il comprend donc l'intérêt de garder le biodigester en activité continue afin de bénéficier de ses avantages.

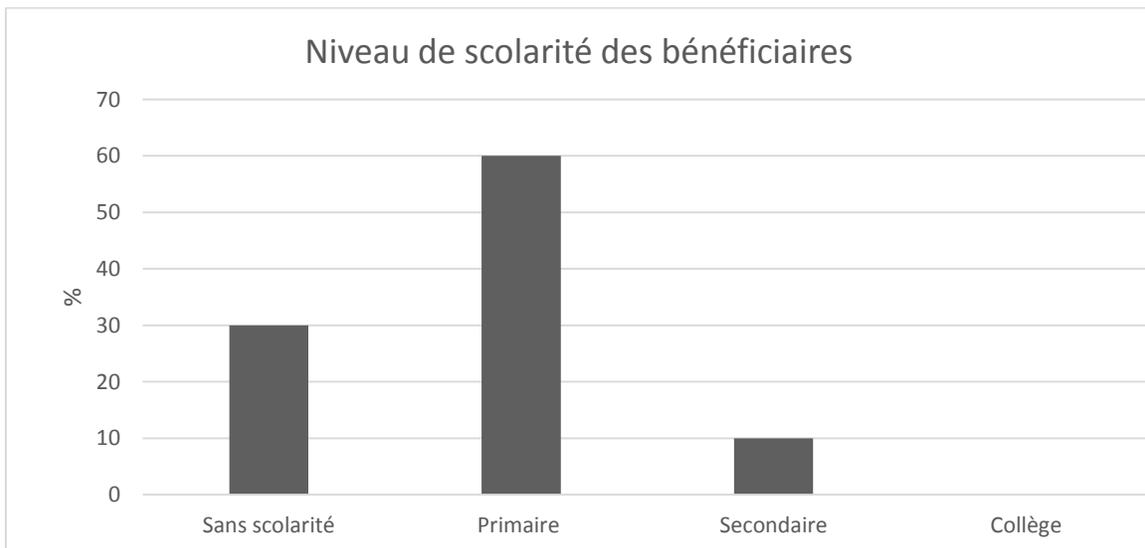


Figure 26: Niveau de scolarité des bénéficiaires interrogés individuellement (n = 57)

b. Les contraintes liées au matériel et à la main-d'œuvre

➤ Le manque de fumier

Les biodigesteurs que propose le PNB utilisent uniquement les déjections animales (bouse de vache, lisier de porcs, etc.) comme matière première pour la production de biogaz. Afin d'assurer une utilisation quotidienne du biogaz, le PNB indique qu'il faut disposer d'un minimum de 4 vaches bien nourries et en stabulation (gardées en enclos) (Sandwidi, 2016). Cela permettrait de récolter une quantité de 20 kg de bouse de vache par jour, c'est-à-dire suffisante pour alimenter le biodigester. Mais sur le terrain, cela n'est pas toujours réalisable. En effet, de nombreux facteurs

entravent la prescription recommandée par le PNB. L'enquête terrain réalisée auprès des personnes détentrices ou non de la technologie indique le manque ou la difficulté d'approvisionnement en bouses de vache comme première contrainte majeure à l'adoption et à l'utilisation du biodigesteur. Les différentes données recueillies lors de l'enquête, à savoir le taux de satisfaction envers la technologie, les raisons de la non-adoption et le nombre d'ouvrages non fonctionnels, convergent effectivement à dire que la contrainte première dans l'adoption de la technologie est la difficulté de se procurer du fumier animal. Rares sont les bénéficiaires qui possèdent 4 bœufs pour pouvoir maintenir le chargement quotidien du biodigesteur. Ceux qui y arrivaient détenaient au minimum un nombre de 10 têtes de bétail.

Les causes de la difficulté d'approvisionnement en fumier reposent sur les techniques d'élevage pratiquées par les producteurs. Par faute de moyens financiers et en raison de leur incapacité à fournir une alimentation suffisante au bétail en stabulation, les producteurs optent pour un élevage en transhumance (figure 27). Cette technique consiste à envoyer le troupeau en pâture sur une longue période de temps (la journée, la semaine, voire des mois) vers des endroits où la végétation et les conditions sont favorables à l'alimentation des animaux. Cette façon de procéder entraîne la perte dans la nature des déjections qui auraient dû servir au chargement du biodigesteur.



Figure 27: Élevage transhumant

➤ La difficulté d'entretien

Le biodigesteur octroyé à l'ensemble des bénéficiaires du projet PRCVM a une dimension de 6 m³ (figure 22). Tel qu'évoqué précédemment, son entretien demande une certaine implication et un dévouement de la part du bénéficiaire. Il faut reconnaître que certaines tâches d'entretien peuvent

demander d'importants efforts physiques et des équipements et du matériel de travail. Par exemple, la préparation du mélange de 20 kg de bouse de vache et 20 kg d'eau nécessite de la souplesse et de la force dans les bras ; la collecte du fumier et de l'eau ainsi que leur transport vers le dispositif demandent un effort physique de la part du propriétaire. En somme, on peut classer les tâches d'entretien du biodigesteur comme des tâches lourdes. Cependant, la majorité des propriétaires sont d'un âge avancé, soit en moyenne 48 ans. Les tâches lourdes ne sont plus recommandées à cet âge. Nombreux sont les bénéficiaires qui disposent de peu, voire de pas du tout de main-d'œuvre pour les accompagner dans leur travail. Dix propriétaires sur les 30 interrogés individuellement indiquent éprouver de la difficulté à assurer l'entretien de leur biodigesteur faute de main-d'œuvre. En moyenne, 2,4 personnes par ménage assurent l'entretien du dispositif. En général, c'est le père et un garçon de la famille qui se partagent les tâches (figure 28). La mère est également souvent impliquée dans les tâches d'entretien.

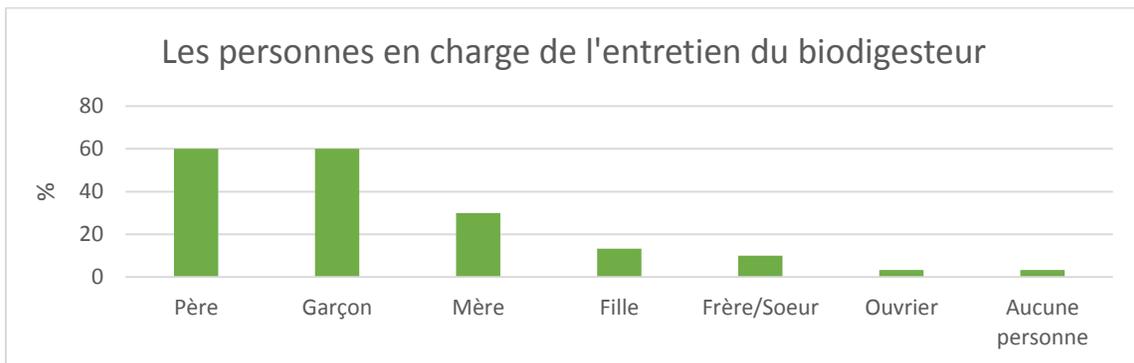


Figure 28: Personnes responsables de l'entretien du biodigesteur dans le ménage (n = 57)

➤ Les tâches d'entretien du biodigesteur au quotidien

Le fait que le biodigesteur soit un modèle à alimentation continu fait qu'il est nécessaire de l'alimenter quotidiennement. Vu la difficulté d'obtenir de la bouse de vache, c'est 60 % des 30 personnes interrogées individuellement qui indiquent arriver à charger le biodigesteur quotidiennement, alors que 10 % d'entre elles disent le charger au moins une fois dans la semaine et 13,33% reconnaissent ne jamais l'avoir chargé. Petite indication à mentionner ici, la grande proportion d'entre eux qui ne respecte pas les proportions de 20 kg de fumier et 20 kg d'eau pour le mélange. Ils sont nombreux à signaler que le chargement est fait au quotidien, mais sont incapables d'indiquer les proportions prises pour le mélange. Le fait de ne pas disposer de suffisamment de fumier par jour les contraint à ne pas respecter les quantités recommandées.

Afin de préparer le mélange, le bénéficiaire doit disposer d'une source d'approvisionnement en matière première et du matériel nécessaire pour exécuter le mélange. Dans l'enquête, nous avons

voulu comprendre les étapes effectuées pour assurer le chargement du biodigesteur. Au sein d'un ménage, des tâches sont attribuées aux personnes impliquées dans l'entretien du digesteur.

La récolte du fumier est assurée habituellement par les garçons ou le père (figure 30). Soixante pourcents (60 %) des personnes interrogées individuellement disent posséder un élevage dans la cour, ce qui facilite la récolte et réduit considérablement la distance entre le lieu d'approvisionnement en fumier et le biodigesteur. Près du quart d'entre elles (23,33 %) indiquent avoir leur élevage dans les champs loin de la cour familiale, alors que 16,33% ont leur élevage dans les parcs à bétail. Ces deux derniers groupes sont confrontés au problème de transport et de ravitaillement du fumier. En effet, nombreux sont ceux qui ne disposent pas de matériel pour la récolte et pour le transport du fumier. La majorité des personnes interrogées assure le transport du fumier à l'aide de paniers et de brouettes (figure 29). Ceux disposant de plus d'équipement le font en charrette et les plus riches en « mototricycle ».

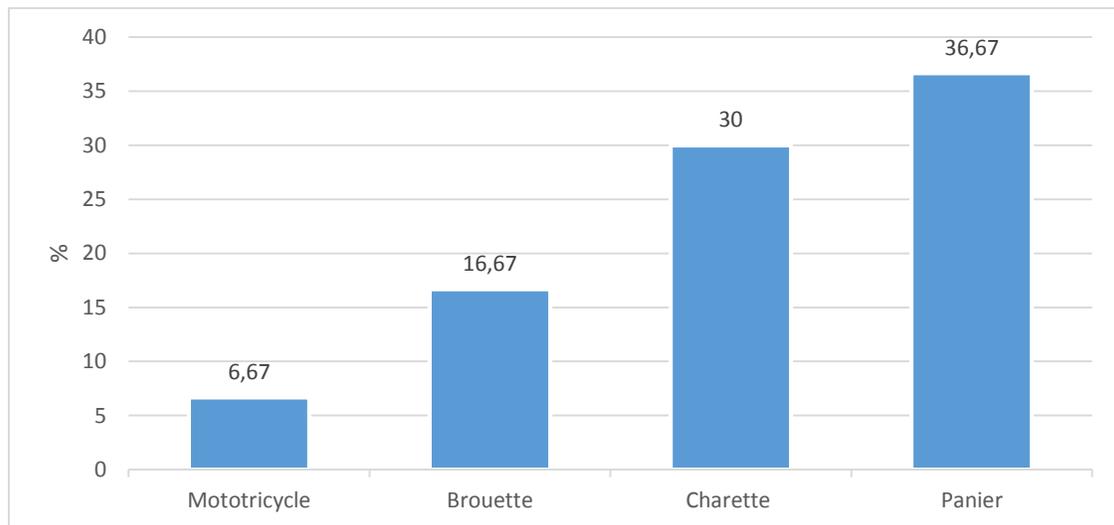


Figure 29: Équipement utilisé pour le transport du fumier (n = 57)

L'approvisionnement en eau est davantage assuré par une fille ou la mère de famille (figure 30). D'après l'enquête, le lieu d'approvisionnement en eau se situe en moyenne à 0,2 km de la cour pour ceux utilisant les distributeurs d'eau publics. Par ailleurs, plus de la moitié des personnes, soit 60 % des gens interrogés individuellement, détiennent une source d'eau (puits, forage) dans leur cour. L'approvisionnement en eau ne constitue pas pour la majorité des personnes un problème significatif pour l'utilisation du biodigesteur.

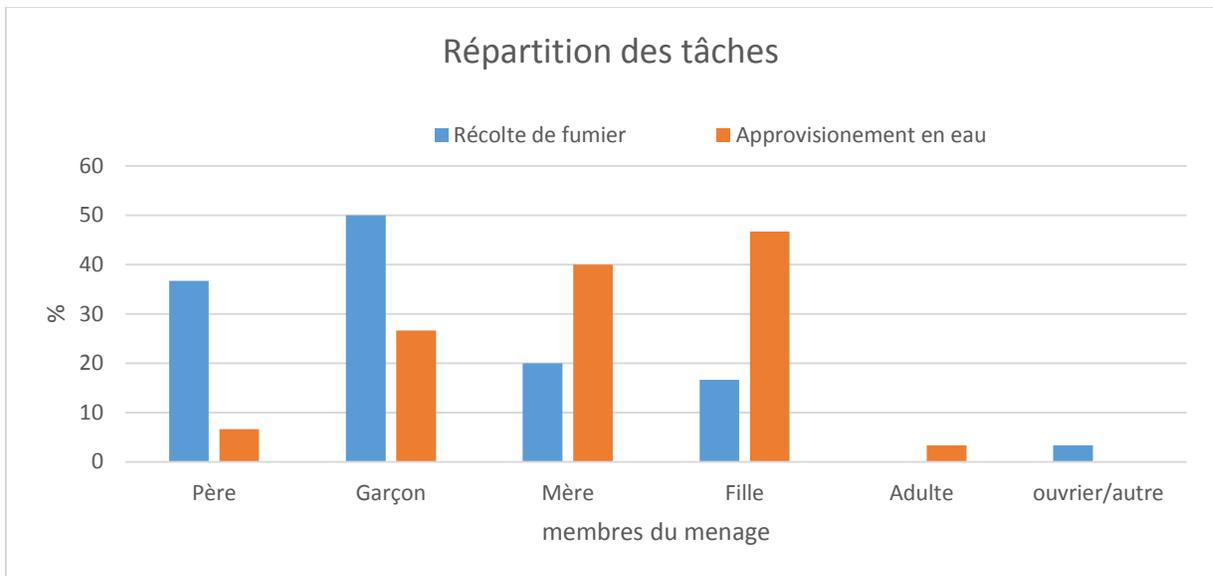


Figure 30: Distribution des tâches afférentes à l'entretien du biodigesteur (n = 57)

c. Les défauts des équipements

Nombreux sont les utilisateurs qui se plaignent de la mauvaise qualité du dispositif installé. Près d'un tiers des bénéficiaires interrogés individuellement (30 %) indiquent ne plus utiliser leur biodigesteur pour des raisons de fuite de gaz, d'infiltration d'eau dans le système durant les pluies, de matériel endommagé ou de construction inachevée du dispositif. En effet, lors de la visite terrain de certains biodigesteurs non fonctionnels, les propriétaires ont souligné le manque de suivi technique après la réception de la technologie. Les plaintes (tableau 4) sont dirigées vers la structure mère (l'UGCPA) et vers les différents maçons et techniciens responsables du suivi technique et de l'entretien des appareils. Il a été constaté que les pannes sont fréquentes après quelques mois d'utilisation du biodigesteur. L'absence et la non-disponibilité du personnel de dépannage, et la difficulté de trouver les pièces de rechange, contraignent les clients à abandonner le chargement et l'utilisation du biodigesteur, ce qui fait hausser le nombre de personnes insatisfaites du service et de la technologie. Les conséquences des différentes pannes de l'ouvrage et le mauvais service à la clientèle poussent les bénéficiaires et les non-bénéficiaires à se désintéresser du produit et même à dissuader de potentiels adoptants.

Tableau 4: Difficultés et problèmes liés à l'utilisation du biodigesteur mentionnés par les bénéficiaires

| Difficultés rencontrées dans l'utilisation du biodigesteur | | |
|--|-----------------------------|---|
| Groupe de répondants | Individuel | 9 groupes participants |
| | % des personnes (n = 57) | Nombre de groupes ayant invoqué le motif |
| Construction et équipement défectueux | 66,7 | 6 |
| Manque de fumier | 43,3 | 7 |
| Manque de main-d'œuvre | 33,3 | 2 |
| Absence de suivi technique, de formation et d'équipements de rechange | 26,7 | 6 |
| Lourdeur des tâches | 23,3 | 2 |
| Manque d'outils de travail | 20,0 | 4 |
| Pannes fréquentes | 16,7 | 6 |
| Problèmes d'eau | 16,7 | 3 |
| Prix et remboursement | 6,7 | 4 |
| Hygiène et odeur | 3,3 | 2 |
| Difficulté du premier chargement | - | 4 |

VII. Recommandations et propositions d'amélioration souhaitées par les producteurs et bénéficiaires du biodigesteur

Trois années se sont écoulées depuis le lancement du projet PRCBM. Le bilan actuel des 79 biodigesteurs visités sur les 200 installés au total indique que 54 sont recensés non fonctionnels, alors que 25 seulement sont toujours en état d'utilisation. Les visites effectuées chez les bénéficiaires et les non-bénéficiaires ont permis de noter les besoins et les recommandations de la population en ce qui concerne les biodigesteurs.

En premier lieu, la population regrette énormément l'absence totale de soutien technique après réception de la technologie. Elle déplore le manque de suivi et d'accompagnement pour l'entretien de l'ouvrage. Un certain nombre de bénéficiaires ont finalisé ou achevé eux-mêmes la construction de l'ouvrage, un désagrément qu'ils n'ont pas manqué de notifier. La technologie étant nouvelle pour la population, il apparaît donc nécessaire d'assister et de guider les bénéficiaires sur l'utilisation et le fonctionnement du biodigesteur. En lien avec ce besoin d'appui, il serait utile de renforcer les capacités de personnel qualifié (maçons, techniciens, vulgarisateurs) afin qu'ils puissent offrir davantage de formation sur le fonctionnement du dispositif, sur son entretien et surtout sur les réparations mineures. En raison du nombre limité des techniciens à qui se référer en situation de panne de l'ouvrage, la population souhaite que soit mis en place du personnel de proximité dans chaque commune. Ces personnes choisies parmi les bénéficiaires seraient formées et outillées pour pouvoir répondre à la demande. Cette façon de faire est déjà observée dans la ville de Dédougou avec Mme Koutou Assetou comme responsable.

En ce qui a trait au grand nombre de biodigesteurs non fonctionnels, la population signale l'usage de matériel de mauvaise qualité pour leur construction. De nombreux bénéficiaires ont subi des pannes après quelques mois seulement d'utilisation. Un cas observé chez la quasi-totalité des personnes bénéficiaires est l'absence d'éclairage dû à la défectuosité ou au bris des lampes à gaz. À la suite des pannes répétitives et non corrigées enregistrées par les bénéficiaires, certains ont été contraints d'arrêter le chargement de leur biodigesteur. Face à cette situation, la population souhaite que l'ensemble des ouvrages non fonctionnels soit réhabilité ou réparé pour la satisfaction de tous.

La population souhaite également que des boutiques ou des lieux d'approvisionnement en matériel de rechange pour les biodigesteurs soient mis sur pied. En effet, un manque chronique d'accessoires (lampe à gaz, foyer...) est observé dans la région. Ni l'UGCPA ni aucune autre structure sur place dans la Boucle du Mouhoun ne dispose d'accessoires de dépannage en cas de panne du biodigesteur.

Considérant ne pas bénéficier des avantages du biodigesteur à la suite du non-fonctionnement de l'ouvrage, nombreux sont les bénéficiaires qui demandent que l'UGCPA revoie à la baisse le prix d'acquisition du biodigesteur et aussi les modalités de remboursement. Ils trouvent peu d'intérêt à payer pour un service imparfait.

Les autres souhaits de la population pour aider à l'amélioration de l'adoption du biodigesteur sont les suivants :

- Offrir des foyers de tailles et de grosseurs différentes. Étant donné la taille variable des familles, le modèle standard de foyer ne répond pas toujours aux besoins des bénéficiaires.
- Offrir des biodigesteurs ayant une capacité de chargement moindre. Le modèle de 6 m³ constitue un gros volume difficile à remplir pour la plupart des bénéficiaires.
- Offrir un outil adapté pour préparer le mélange de bouse de vache et d'eau.
- Offrir des animaux et du matériel de travail (charrettes, pelles...).
- Sécuriser les fosses à effluent par des dalles de couverture.
- Prendre en charge le premier chargement du biodigesteur.
- Moderniser le biodigesteur pour d'autres fins telles que l'alimentation d'un réfrigérateur ou d'appareils électroniques (téléphone cellulaire, radio, etc.).

VIII. Piste d'amélioration de la production de biogaz par le biodigesteur

1. Optimisation du procédé de méthanisation par pré-traitement de la biomasse

Une bonne production de biogaz dépend de la qualité du fumier présent dans le digesteur. En effet, le type et l'âge de l'animal, son alimentation et ses conditions de vie, la durée de stockage et le conditionnement des déchets sont des facteurs qui affectent la qualité et la quantité du gaz obtenu. Le co-traitement physico-chimique des déchets avant l'étape d'hydrolyse dans le digesteur est une possibilité pour améliorer la biodégradabilité des déchets durant le processus de méthanisation (Carrère, 2011). Le co-traitement peut être possible soit par traitement thermique ou thermochimique, par ajout de bases ou d'acides ou par traitement mécanique (ultrasons, broyage). Le co-traitement permet d'hydrolyser physiquement ou chimiquement les composés, ou de réduire la taille des déchets solides pour rendre leur surface plus accessible aux enzymes extracellulaires. De cette façon, on pourrait réduire le temps de séjour de la matière dans le digesteur et améliorer le rendement du processus de méthanisation. Le co-traitement serait alors intégré dans le procédé de digestion anaérobie en tant que pré-traitement des déchets dans notre cas.

La méthode par pré-traitement consiste à procéder à une macération de la déjection animale en deux phases :

- La première phase va consister à préparer le mélange fumier + eau dans un bac fermé servant d'unité de macération. L'idée est de laisser macérer le mélange durant 3 à 5 jours à une température supérieure à 30 °C (au soleil par exemple). L'objectif est d'obtenir des particules de plus faible taille (< 2 mm) et d'accélérer l'étape de décomposition de la matière organique avant son introduction dans le digesteur. Il est reconnu que la phase d'hydrolyse représente la partie la plus longue et la plus lente du processus de méthanisation. Au cours de cette phase, les macromolécules qui constituent la masse cellulaire de la matière organique (protéines, polysaccharides et graisses) sont réduites en plus petite taille. Les molécules deviennent alors plus solubles dans l'eau (Dhamodharan Kondusamy & Ajay S. Kalamdhad, 2014; Moletta, 2002a). Des recherches ont prouvé que les meilleurs potentiels méthanogènes ont été obtenus avec des particules plus petites. De plus, des essais expérimentaux effectués dans 7 installations danoises de méthanisation centralisée de lisier ont montré que la macération a généralement induit une augmentation de la production de méthane de 5 à 25 % (Carrère, 2011). Il faut remarquer ici que l'unité de macération était équipée d'un système de lames coupantes rotatoire. Le fait de réaliser la macération à une température > 30 °C permet d'opérer une hydrolyse thermique de la matière. Le traitement par la chaleur entraîne une dégradation de la structure en gel des boues, une destruction des membranes

des cellules, libérant d'un coup les composés intracellulaires et les exopolymères des matrices des particules, ce qui les rend plus accessibles pour la dégradation anaérobie (Carrère, 2011). De nombreuses études sur l'amélioration de la digestion anaérobie attestent que l'utilisation des pré-traitements thermiques améliore les performances de la digestion anaérobie des déjections animales en augmentant le gain en production de méthane, mais aussi en assainissant les agents pathogènes bactériens et viraux. En effet, la bactérie *Escherichia coli* est inactivée par un traitement de 2 heures à des températures supérieures à 55 °C et les virus sont inactivés à 60 °C pendant au moins 30 minutes. Il faut remarquer que dû à la présence d'azote ammoniacal (inhibiteur de la méthanogénèse) dans le lisier, le traitement thermique à 80 °C peut entraîner une réduction de la méthanisation (Carrère, 2011).

Un avantage supplémentaire de cette pratique est la possibilité de contrôler le pH et la température du substrat avant son introduction dans le digesteur :

- La deuxième phase consiste à mesurer la valeur du pH et la température du substrat macéré à l'aide d'un pH-mètre à papier et d'un thermomètre. Ainsi, il est plus facile d'ajuster la température du substrat à 30 - 35 °C et son pH à 7 avant son introduction dans le digesteur. Or, ces deux paramètres sont essentiels au bon processus de méthanisation des déchets.

2. Production de biogaz à partir de biomasses alternatives

Il existe des matières premières végétales pouvant se substituer aux déchets animaux dans la production de biogaz en digestion anaérobie. Parmi les matières végétales, on peut citer notamment les résidus de légumes et de fruits (betterave, mangue, pomme de terre, etc.). D'autres plantes constituent également une bonne matière première biodégradable pour la méthanisation. C'est le cas des résidus de tonte des pelouses, des résidus secs de maïs et de la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*). Dans le contexte du Burkina Faso, nous avons identifié deux plantes qui sont susceptibles de fournir de la matière organique biodégradable exploitable dans la production du biogaz. Il s'agit de la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) et des noix du karité (*Vitellaria paradoxa*), un arbre très fréquent dans le paysage agricole. Par contre, chaque substrat présente, outre ses qualités, des contraintes que nous allons tenter de caractériser dans la perspective d'effectuer des essais expérimentaux de production de biogaz en digestion anaérobie.

a. Caractérisation de la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*)

Nous nous intéressons à la jacinthe d'eau, car elle est une plante envahissante et constitue une menace pour la biodiversité aquatique des retenues de barrages du Burkina Faso. Sa prolifération en vient parfois à recouvrir toute la surface de l'eau. L'intention est de participer à une meilleure gestion de la jacinthe d'eau en l'employant comme matière première à la production de biogaz. Des études expérimentales ont démontré le pouvoir biométhanisant de la jacinthe d'eau (Almoustapha, Millogo-Rasolodimby, & Kenfack, 2008; Madamwar, Patel, & Patel, 1990; Patel, Desai, & Madamwar, 1993). En effet, en Inde, dans la perspective de vouloir remplacer la bouse de vache longtemps utilisée comme substrat de digestion, Patel et al. (1993) ont réussi une production de biogaz avec la jacinthe

d'eau. Nous avons donc réalisé une étude dans le but de déterminer la valeur éventuelle de l'utilisation de jacinthes d'eau et de noix de karité pour la production de biogaz au Burkina Faso. La méthodologie utilisée et les résultats obtenus sont présentés dans ce qui suit.



❖ **Teneur en humidité et en biomasse sèche de la jacinthe d'eau**

Principe et méthode

Les plantes de jacinthe d'eau ont été broyées mécaniquement au mélangeur. Une certaine quantité de broyat a été répartie en 4 échantillons dans des creusets, puis pesée et séchée au four pendant 24 h à 105 °C. Le pourcentage d'humidité de la plante a ensuite été déduit des biomasses sèches des échantillons. Cette technique répond à la norme de Commission de normalisation AFNOR X 34 B N° 110 (Normalisation, 2002b).

La teneur en humidité (% H) est donnée par la formule suivante : $\% H = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100$

Où m_1 : masse du creuset à vide ; m_2 : masse creuset + biomasse humide ; m_3 : masse creuset + biomasse sèche.

La matière sèche MS se calcule par la formule suivante : $MS = 100 - \% H$

Les teneurs en matière sèche des différents creusets sont présentées au tableau 5.

Tableau 5: Teneur en humidité et en matière sèche de la jacinthe d'eau

| Creusets | Creuset X | Creuset Y | Creuset Z | Creuset + | Moyenne |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Masse du creuset à vide (g) | 7,528 | 7,478 | 7,165 | 7,700 | – |
| Masse creuset + masse de la jacinthe d'eau (g) | 9,559 | 9,475 | 9,256 | 9,729 | – |
| Masse creuset + masse de la jacinthe d'eau sèche (g) | 7,766 | 7,719 | 7,405 | 7,949 | – |
| Teneur en humidité (%) | 88,285 | 88,017 | 88,534 | 87,729 | 88,141 |
| Teneur en MS (%) | 11,714 | 11,982 | 11,47 | 12,270 | 11,858 |

❖ Teneur en cendre et matière volatile

Principe

La teneur en cendre permet de déterminer la quantité de matière volatile. Trois échantillons de la jacinthe d'eau broyée ont été brûlés au four à une température de 550 ± 10 °C sur une période de temps fixe, comme cela est précisé dans ce qui suit. Afin de calculer la teneur en cendre de la jacinthe d'eau, on a procédé de la façon suivante :

- Chauffage des creusets vides dans le four à 550 °C durant 60 min. Laisser refroidir les creusets puis, peser la masse à vide m_1 .
- Placer les trois échantillons de la jacinthe d'eau déshydratée dans les différents creusets et peser la masse m_2 .
- Introduire dans le four les échantillons, puis chauffer selon la programmation suivante :
Période 1 : élever la température du four à 250 °C pendant une durée de 50 minutes. Maintenir ce niveau de température pendant 60 minutes pour permettre l'évacuation des composés volatils de la matière.
Période 2 : augmenter la température du four à 550 ± 10 °C sur une période de 60 minutes et la maintenir pendant 120 minutes.
- Retirer les creusets du four et laisser refroidir à température ambiante, puis peser les masses m_3 des échantillons de cendre de jacinthe d'eau.

Cette technique répond à la norme de Commission de normalisation AFNOR X 34 B N° 113 (Normalisation, 2002a).

La teneur en cendre de l'échantillon est déterminée par la formule suivante :

$$\% \text{ Cendres} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 * \frac{100}{100 - \% H}$$

Les données recueillies sont présentées au tableau 6.

Tableau 6: Teneur en cendre et en matière volatile de la jacinthe d'eau

| Creusets | Creuset X | Creuset Y | Creuset Z | Moyenne |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| Masse du creuset à vide (g) | 37,758 | 85,135 | 82,688 | – |
| Masse creuset + masse de la jacinthe d'eau sèche (g) | 38,013 | 85,382 | 82,952 | – |
| Masse creuset + cendre (g) | 37,831 | 85,209 | 82,767 | – |
| Teneur en cendre (%) | 28,800 | 29,971 | 30,041 | 29,604 |
| Teneur en matière volatile MV (%) | 71,200 | 70,028 | 69,958 | 70,395 |

b. Caractérisation des noix de karité

Le Burkina Faso est réputé comme zone à fort potentiel de production de karité. Ce faisant, de nombreuses filières agroalimentaires de karité sont créées et procurent un revenu financier non négligeable aux acteurs de la filière que sont habituellement les femmes. Engagées principalement dans la production et l'exportation du beurre de karité, ces filières karité génèrent une importante quantité de déchets organiques qui sont non traités. La valorisation des résidus de noix de karité (sous-produits de l'extraction du beurre) dans la production de biométhane viendrait non seulement atténuer le coût énergétique relié à la production du beurre, mais aussi stimuler l'usage des biodigesteurs comme un plan écologique de traitement d'eaux usées dans les différentes unités de production du pays.

- Principe de la co-digestion

Comme on l'a vu, la co-digestion est un concept alternatif de digestion anaérobie dans laquelle la bouse de vache ou toute autre matière première est combinée avec une autre matière organique ou un déchet biodégradable ayant une teneur organique élevée. Il s'agit donc ici d'effectuer une digestion d'un mélange adéquat d'une quantité de bouse de vache et de résidus de noix de karité, obtenus après extraction du beurre de karité, pour produire du biométhane. De cette façon, la présence de la matière organique issue des noix de karité viendrait compenser l'apport nutritionnel

manquant de la bouse de vache. Cette méthode permettrait de résoudre le déficit en bouse de vache décrit plus haut.

Une publication a montré que les noix de karité renfermaient une concentration de 40 à 50 % de matières grasses. Après extraction du beurre, les résidus issus de la transformation peuvent encore en contenir une certaine concentration (environ 13 %). Les résidus de noix de karité peuvent donc constituer une source de matière première biodégradable à haut potentiel énergétique utilisable pour la production de méthane en digestion anaérobie. Ofosu et Aklaku (2010) ont pu mettre en évidence la capacité de produire du biométhane grâce à la méthode de co-digestion de fumier de bovin et de résidus de noix de karité.

❖ Teneur en humidité et en masse sèche

La détermination de la masse sèche suit le même principe expérimental adopté pour la jacinthe d'eau. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 7.

Tableau 7: Teneur en humidité et en matière sèche des résidus de noix de karité

| Creusets | Creuset A | Creuset X | Creuset Z | Moyenne |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| Masse du creuset à vide (g) | 84,877 | 37,758 | 36,998 | – |
| Masse creuset + masse des résidus de noix de karité (g) | 89,001 | 41,953 | 40,156 | – |
| Masse creuset + masse sèche des résidus de noix de karité (g) | 85,816 | 38,761 | 37,732 | – |
| Teneur en humidité (%) | 77,173 | 76,083 | 76,765 | 76,674 |
| Teneur en MS (%) | 22,826 | 23,916 | 23,234 | 23,325 |

❖ Teneur en cendre et matière volatile

La détermination du taux de matière volatile suit le même principe expérimental adopté pour la jacinthe d'eau. Les données recueillies sont présentées au tableau 8.

Tableau 8: Teneur en cendre et en matière volatile des résidus de noix de karité

| Creusets | Creuset A | Creuset X | Creuset Z | Moyenne |
|---|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Masse du creuset à vide (g) | 84,8736 | 37,7578 | 36,998 | – |
| Masse creuset + masse sèche des résidus de noix de karité (g) | 85,8158 | 38,7612 | 37,7317 | – |
| Masse creuset + cendre (g) | 84,8756 | 37,7942 | 37,0234 | – |
| Teneur en cendre (%) | 0,212 | 3,627 | 3,461 | 2,433 |
| Teneur en matière volatile MV (%) | 99,787 | 96,372 | 96,538 | 97,566 |

c. Caractérisation de la bouse de vache

❖ **Teneur en humidité et en masse sèche**

La détermination de la masse sèche suit le même principe expérimental adopté pour la jacinthe d'eau. Les données recueillies sont présentées au tableau 9.

Tableau 9: Teneur en humidité et en matière sèche de la bouse de vache

| Creusets | Creuset X | Creuset I | Creuset II | Moyenne |
|--|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Masse du creuset à vide (g) | 37,763 | 85,164 | 82,761 | – |
| Masse creuset + masse de la bouse de vache (g) | 39,960 | 91,702 | 88,319 | – |
| Masse creuset + masse sèche de la bouse de vache (g) | 38,239 | 86,829 | 84,044 | – |
| Teneur en humidité (%) | 78,350 | 74,535 | 76,909 | 76,659 |
| Teneur en MS (%) | 21,650 | 25,464 | 23,090 | 23,401 |

❖ **Teneur en cendre et matière volatile**

La détermination de la matière volatile suit le même principe expérimental adopté pour la jacinthe d'eau. Les données recueillies sont présentées au tableau 10.

Tableau 10: Teneur en cendre et en matière volatile de la bouse de vache

| Creusets | Creuset X | Creuset I | Creuset II | Moyenne |
|--|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Masse du creuset à vide (g) | 37,763 | 85,164 | 82,760 | – |
| Masse creuset + masse des résidus de la bouse de vache (g) | 40,091 | 86,821 | 84,044 | – |
| Masse creuset + cendre (g) | 39,118 | 85,898 | 83,229 | – |
| Teneur en cendre (%) | 58,204 | 44,260 | 36,515 | 46,32 |
| Teneur en matière volatile (MV) (%) | 41,795 | 55,746 | 63,484 | 53,67 |

d. L'essai expérimental de production de biogaz

Un essai a ensuite été réalisé pour déterminer la production de biogaz à partir de ces trois matières : bouse de vache, jacinthe d'eau et résidus de noix de karité.

L'expérimentation a été conduite de la façon suivante :

- Une première fermentation avec la bouse de vache comme unique matière première a été réalisée. Les données récoltées ont servi de témoin pour la comparaison avec les autres digestions.
- La deuxième fermentation a été réalisée avec la jacinthe d'eau comme unique matière première. Le but était d'évaluer le potentiel méthanisant de ce substrat sans autre ajout que l'inoculum de bouse de vache pour apporter la quantité de bactéries nécessaire à l'activité microbienne.
- La troisième fermentation a consisté en une co-digestion utilisant la bouse de vache et les résidus de noix de karité comme substrat. La raison de cette co-digestion est que les résidus de noix de karité seuls ne permettent pas la méthanisation. Le mélange adéquat avec un autre substrat est donc nécessaire.

3. Préparation du dispositif expérimental de production de biogaz

Fermentation 1

La bouse de vache a été fraîchement récoltée dans une ferme de bovins. Une quantité de 50 g de cette bouse a été prélevée et mélangée dans 50 g d'eau. Le pH du mélange a été mesuré et ensuite équilibré à 7,1 avec une solution de NaOH 1N. Le mélange a été introduit dans une bouteille de

laboratoire de 500 ml qui a servi de digesteur pilote. Le dispositif a été fixé à un manomètre à eau et placé dans un bain-marie à 30 °C.

Fermentation 2

L'ensemble de la plante (feuilles, tiges et racines) a été broyé au mélangeur pour utiliser toutes les parties de la plante comme biomasse à digérer. Une quantité de 50 g de jacinthe d'eau broyée a été prélevée et mélangée à 75 g d'eau. Le pH initial du mélange (6,65) a été mesuré et équilibré à 7,04 avec une solution de NaOH 1N. La bouse de vache a été choisie comme inoculum bactérien et une quantité de 1,28 g a donc été rajoutée au mélange. Le mélange a été introduit dans une bouteille de laboratoire de 500 ml qui a servi de digesteur pilote. Le dispositif a été fixé à un manomètre à eau et placé dans un bain-marie à 30 °C.

Fermentation 3

Un ratio (en biomasse) de 50 : 50 a été choisi pour le mélange des deux substrats, soit 25 g de bouse de vache et 25 g de résidus de noix de karité. Une quantité de 35 g d'eau a été rajoutée au mélange pour respecter les 90 % d'eau du niveau d'humidité du substrat à digérer. Le pH du mélange mesuré initialement à 5,66 a été équilibré à pH 7.

Paramètres de fermentation

Les digesteurs ont été placés dans un bain-marie et soumis à une température de fermentation de 30 ± 2 °C sans agitation ni alimentation continue. La production de biogaz a été évaluée à l'aide du manomètre à eau en suivant le principe de la différence de pression d'eau exercée. Le déplacement du niveau de l'eau dans le manomètre est mesuré (en cm) quotidiennement. L'arrêt de déplacement du niveau de l'eau dans le manomètre marque la fin de la digestion et détermine le temps de rétention du substrat dans le digesteur.

Comme on ne disposait que de deux digesteurs pilotes, les trois fermentations ne pouvaient pas s'effectuer au cours de la même période d'essai. Les fermentations 2 et 3 ont donc été réalisées au même moment, et la fermentation 1 au cours d'une autre période d'essai.

4. Résultats et discussion

Les résultats des fermentations sont présentés à la figure 31.

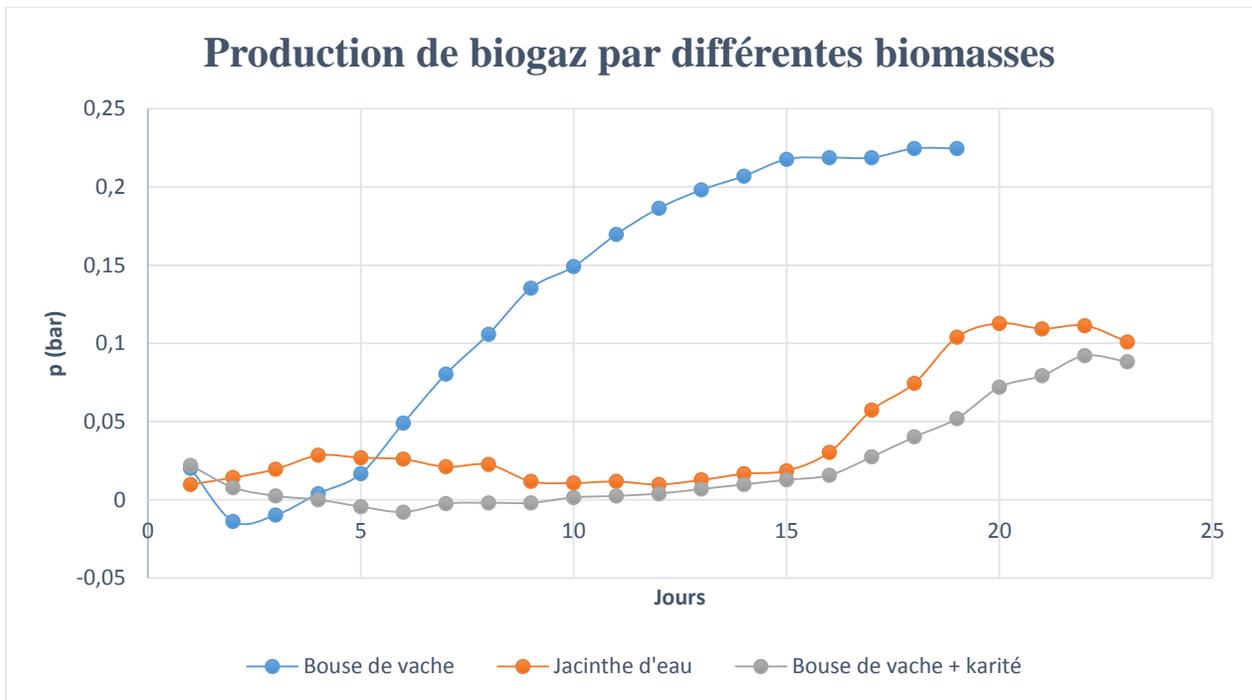


Figure 31: Production de biogaz par digestion anaérobie en bar/jour à partir de bouse de vache, de jacinthe d'eau et de bouse de vache + résidus de noix de karité.

La figure montre qu'à l'échelle du laboratoire, nous sommes parvenus à produire du biogaz avec les trois substrats sélectionnés. Cependant, chaque matière première testée se comporte différemment pour ce qui est du rendement en biogaz et de la vitesse de digestion.

La production de biogaz à partir de la bouse de vache est nettement plus élevée que celles obtenues avec les deux autres substrats testés. En effet, on observe qu'après 5 jours de digestion, la production de biogaz avec la bouse de vache devient exponentielle. La pression passe de 0,01 bar à 0,14 en l'intervalle de 10 jours et continue sa progression pour se stabiliser à 0,23 bar. Le temps de rétention pour la bouse de vache dans notre cas est d'une quinzaine de jours, car c'est là que la production semble se stabiliser.

En ce qui concerne la fermentation de la jacinthe d'eau et la co-fermentation bouse de vache + résidus de noix de karité, durant les 15 premiers jours de digestion, on observe une progression très lente de la production de biogaz. Le début d'une production exponentielle de biogaz n'est constaté qu'après 15 jours de digestion. La pression maximale atteinte pour les deux fermentations demeure par ailleurs très bas ($\leq 0,1$ bar) comparativement à celle de la bouse de vache.

L'addition des résidus des noix de karité ne semble donc pas stimuler la production du biogaz, bien au contraire. Pourtant, la caractérisation en MS des deux substrats employés montrait une réelle similitude ($MS_{\text{bouse de vache}} = 23,40 \%$ et $MS_{\text{résidus de karité}} = 23,32 \%$). En considérant uniquement la caractérisation en MS de la bouse de vache et des résidus de noix de karité, nous nous attendions à obtenir des productions de biogaz similaires à celle de la bouse de vache seule. Ofosu and Aklaku (2010), au cours de leurs travaux sur la co-digestion bouse de vache + résidus de noix de karité, expliquent qu'un meilleur rendement en biogaz n'est atteint que lorsque la proportion en bouse de vache est supérieure à celle des résidus de noix de karité et lorsque le pH est maintenu à l'optimum durant le processus de digestion. Considérant que les résidus de noix de karité sont reconnus être riche en AGV (Ofosu & Aklaku, 2010), on suppose qu'une forte présence d'AGV dans le milieu a pu conduire à une baisse du pH et, du coup, au déséquilibre du processus de méthanisation. Cela pourrait expliquer pourquoi il a fallu plus de 15 jours de fermentation pour que la production du biogaz démarre. Les microorganismes ont probablement mis plus de temps pour s'acclimater au milieu. Il est donc nécessaire de suivre la stabilité du pH durant la digestion afin de favoriser l'activité bactérienne lors de la méthanogénèse. Une autre alternative serait d'améliorer le pouvoir tampon du substrat en augmentant la proportion de bouse de vache par rapport à celle des résidus de noix de karité dans le milieu.

En comparant la production de biogaz à partir de la jacinthe d'eau et celle avec la bouse de vache, on peut noter que la jacinthe d'eau a mis un plus de temps de latence avant de commencer la production de biogaz, soit 15 jours contre 4 jours pour la bouse de vache. Cette faible vitesse de dégradation de la jacinthe d'eau peut être expliquée par plusieurs facteurs.

Premièrement, l'inoculum introduit dans le substrat de la jacinthe d'eau a été plus restreint (1,29 g d'inoculum). Il a donc fallu un plus long temps de latence dans le processus de digestion pour permettre la croissance et la colonisation bactérienne du milieu. Deuxièmement, la taille des résidus de la jacinthe d'eau était plus grosse que celle des particules de la bouse de vache. Or, la taille des particules du substrat constitue un critère important dans la digestion anaérobie. Plus elles sont petites, plus les bactéries ont un accès rapide aux nutriments pour leur croissance et leur activité métabolique.

Un autre point à prendre en considération serait le fait que la bouse de vache, formée essentiellement de matière végétale, a déjà subi une phase de digestion dans le rumen de l'animal, ce qui augmente sa vitesse de dégradation. La jacinthe d'eau n'ayant pas subi de prétraitement physico-chimique avant le processus de digestion met donc un plus long temps de latence au cours du processus de méthanisation.

En résumé, on peut établir que la production de biogaz par la digestion anaérobie de la bouse de vache est la plus efficace des substrats testés.

CONCLUSION

La fin du 17^e siècle aura marqué la découverte de la biométhanisation. Avec les recherches, les scientifiques sont parvenus à comprendre son mécanisme et sont arrivés à le reproduire à partir des matières résiduelles putrides vers la fin des années 1800. Désormais, la digestion anaérobie constitue une avancée technologique éprouvée permettant de valoriser les déchets organiques sous forme de biogaz et d'amendements organiques. Dans le contexte européen, la biométhanisation a acquis une maturité technologique et son utilisation est d'une importance industrielle. Elle s'intègre dorénavant aux systèmes de traitement des effluents dans les stations d'épuration municipales. En Asie, comme dans plusieurs pays du Sud, elle est davantage appliquée comme outil domestique générateur d'énergie.

En effet, la demande grandissante en énergie verte encourage les gouvernements à développer et adopter des technologies de recyclage et de valorisation des déchets pour la production de bioénergie. Le continent africain, présentant un besoin de développement social et économique, prend de plus en plus part à ce virage bioénergétique. De nombreux pays intègrent désormais dans leur programme de développement la vulgarisation du biogaz. Le Burkina Faso l'un des pays en question. Déjà avancé en la matière, il a mis en place un Programme national de biogaz visant à la promotion de la technologie. L'étude terrain sur l'adoption du biodigester dans une des régions du pays a permis de voir que le biogaz contribuait significativement à l'amélioration des conditions de vie de la femme et de la famille, mais aussi, au développement socio-économique des utilisateurs. Cependant, la production présente un certain nombre de contraintes qui ont été mises en lumière autant par les utilisateurs que certains non-utilisateurs de la technologie. L'analyse des données recueillies montre toutefois que ces contraintes ne sont pas immuables et pourraient être levées au moyen d'interventions qui sont à la portée des promoteurs des biodigesteurs s'ils peuvent bénéficier de ressources adéquates pour ce faire.

Références

- Agrinova, Martel, S., & Desmeules, X. (2013). *Valorisation agronomique des digestats de méthanisation*. Retrieved from Québec: <http://www.agrinova.qc.ca/>
- Almoustapha, O., Millogo-Rasolodimby, J., & Kenfack, S. (2008). Production de biogaz et de compost à partir de la jacinthe d'eau pour un développement durable en Afrique sahélienne. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 8(1).
- Amarante, J. A. (2010). *Biométhanisation des déchets putrescibles municipaux-technologies disponibles et enjeux pour le Québec*. (Maîtrise en environnement (M.Env) Essai), Université de Sherbrooke, Québec.
- Anonyme. (2013). *Projet Résilience climatique dans la Boucle du Mouhoun*. UPA, L'Oeuvre Léger, UGCPA-BM Document inédit.
- Bambara, X. (2016). Fiche d'information sur le Programme National de Biodigesteurs du Burkina Faso Burkina Faso: Document inédit.
- Bernet, N., & Buffière, P. (2008). Caractérisation de la mise en oeuvre de la méthanisation *La méthanisation, Moletta, R.* (2e éd ed., pp. 87-113). Paris: TEC & DOC.
- Brodeur, C., Crowley, D., Desmeules, X., Pigeon, S., & St-Arnaud, R. (2008). La biométhanisation à la ferme. *Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec*.
- Buffière, P., Carrère, M., Lemaire, O., & Vasquez, J. (2007). Guide méthodologique pour l'exploitation d'unités de méthanisation de déchets solides: Projet METHAPI-Expertise. *Centre de Recherche Propreté & Énergie*, 29.
- Carrère, H. (2011). Co-traitements physico-chimiques *La méthanisation, Moletta, R.*, (2e éd ed., pp. 247). Paris: TEC & DOC.
- Cresson, R. (2006). *Étude du démarrage de procédés intensifs de méthanisation, Impact des conditions hydrodynamique et de la stratégie de montée en charge sur la formation et l'activité du biofilm*. Thèse de l'Université de Montpellier, France.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources : an introduction*. Weinheim [Germany]: Wiley-VCH.
- Dhaked, R. K., Singh, P., & Singh, L. (2010). Biomethanation under psychrophilic conditions. *Waste Management*, 30(12), 2490-2496. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.015>
- Dominion & Grimm Environnement inc. (2016). BIOGAZ LIPP. Retrieved from <http://www.dominiongrimm.ca/fr/biogaz>
- Egigian Nichols, C. (2004). Overview of anaerobic digestion technologies in Europe. *BioCycle*, 45(1), 47-53.
- Godon, J.-J. (2008). Aspects biochimiques et microbiologiques de la méthanisation *La méthanisation, Moletta, R.* (1er éd ed., pp. 61-85). Paris: TEC & DOC.
- Gouvernement Burkina Faso. (2016). Plan National de Développement Économique et Social 2016-2020. Burkina Faso: Gouvernement du Burkina Faso.
- House, D. (2006). *Biogas handbook*. [United States]: Alternative House Information.
- Institut Géographique du Burkina. (2016). Burkina Faso Boucle du Mouhoun Burkina Faso: IGB.
- Kabore, S. L. (2013). Politique sectorielle de l'énergie 2014 - 2025. In Ministère des Mines et de l'Énergie (Ed.). Burkina Faso: Ministère des Mines et de l'Énergie.
- Kalogo, Y., & Verstraete, W. (2002). Digestion anaérobie des déchets solides. *Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires*, 333-410.
- Karam, A. (2015). Chapitre 1 : Introduction : Les activités humaines et l'environnement *SLS-6016*. Québec: Université Laval.

- Karki, A. B., Nakarmi, A., Dhital, R. P., & Sharma, I. (2015). *Biogas as Renewable Source of Energy in Nepal. Theory and Development* (3rd ed.). Nepal: Alternative Energy Promotion Centre (AEPC).
- Kompogas, A. (Producer). (2007). Mechanical-biological waste treatment based on the KOMPOGAS process. Retrieved from https://www.google.ca/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwie6dyqmPzQAhVK1oMKHdPkAbIQFggsMAI&url=http%3A%2F%2Fwww.elogrupo.com%2Fspain%2Fdownload_arq.asp%3Faq%3DKompogas.pdf&usg=AFQjCNEdW2_liPXbQiHtB5i4t8fqGC4vWQ&sig2=4K1aDCs65fN5YFo6W2Dd2w&bv_m=bv.142059868,d.amc
- Kondusamy, D., & Kalamdhad, A. S. (2014). Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1821-1830.
- Kondusamy, D., & Kalamdhad, A. S. (2014). Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1821-1830. doi:10.1016/j.jece.2014.07.024
- La Farge, B. d. (1995). *Le biogaz : procédés de fermentation méthanique*. Paris: Masson.
- Lipp. (2016). Behälter und Systemlösungen Tanks and System Solutions. Retrieved from <http://www.lipp-system.de/de/behaelter/fermenter/>
- Liu, C.-f., Yuan, X.-z., Zeng, G.-m., Li, W.-w., & Li, J. (2008). Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, 99(4), 882-888. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.013>
- Madamwar, D., Patel, A., & Patel, V. (1990). Effect of temperature and retention time on methane recovery from water hyacinth-cattle dung. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 70(5), 340-342. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0922-338X\(90\)90146-N](http://dx.doi.org/10.1016/0922-338X(90)90146-N)
- Mangel, N. (2008). Les Souches microbiennes en presence dans un methaniseur Retrieved from <http://web04.univ-lorraine.fr/ENSAIA/marie/web/ntic/pages/2008/mangel.html#bact%E9ries%20hydrolythiques>
- Marchaim, U. (1994). *Les procédés de production de biogaz pour le développement de technologies durables*. Rome: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Moletta, R. (2002a). *Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires*. Paris: Éditions TEC & DOC.
- Moletta, R. (2002b). La méthanisation de la matière organique *Aspects généraux*. s. l.: Moletta Méthanisation.
- Moletta, R. (2011a). *La méthanisation* (2e éd ed.). Paris: TEC & DOC.
- Moletta, R. (2011b). Technologies de la méthanisation de la biomasse Déchets ménagers et agricoles. *La méthanisation* (2e ed.), 177.
- Moletta, R. (2011c). Technologies de traitement des effluents industriels par la méthanisation *La méthanisation* (2e ed.) (pp. 133). Paris: TEC & DOC.
- Moletta, R., & Verstraete, W. (2011). La méthanisation dans la problématique énergétique et environnementale *La méthanisation* (2e ed. ed., pp. 1). Paris: TEC & DOC.
- Normalisation, U. A. (2002a). Biocombustibles solides – Méthode pour la détermination de la teneur en cendre. In U. A. Association Française de Normalisation (Ed.), *Commission de normalisation AFNOR X 34 B N° 113 Biocombustibles solides*. Europe: AFNOR.
- Normalisation, U. A. (2002b). Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method In AFNOR (Ed.), *Commission de normalisation AFNOR X 34 B N° 110 Biocombustibles solides*: Association Française de Normalisation.

- Office National de l'Assainissement du Sénégal. (2013). *Etude d'établissement d'une base de référence pour le projet biogaz*. Retrieved from Senegal:
- Ofosu, M., & Aklaku, E. (2010). Determining the optimum proportion of shea waste in anaerobic co-fermentation process. *Journal of Science and Technology (Ghana)*, 30(1).
- Ostrem, K. (2004). Greening waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. *Earth Engineering Center Columbia University*, 6-9.
- OWS. (2016). Installation Biogaz Retrieved from http://www.ows.be/fr/household_waste/dranco/
- Patel, V., Desai, M., & Madamwar, D. (1993). Thermochemical pretreatment of water hyacinth for improved biomethanation. *Applied biochemistry and biotechnology*, 42(1), 67-74.
- Perron, F. (2010). *Potentiel énergétique et gains environnementaux générés par la biométhanisation des matières organiques résiduelles au Québec*. (Maîtrise), Université de Sherbrooke, Québec.
- Programme National de Biodigesteur - Burkina Faso (PNB-BF). (2015). Atelier National sur « L'Énergie Domestique durable au Mali » Burkina Faso: Document inédit.
- Programme National de Biodigesteur - Burkina Faso (PNB-BF). (2016). Rencontre d'information avec le Conseil Régional de la Boucle du Mouhoun. Dédougou - Burkina Faso: Document inédit.
- Rajeshwari, K. V., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., & Kishore, V. V. N. (2000). State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 135-156. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00014-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00014-3)
- RECORD, & Couturier, C. (2009). Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse. RECORD: Rapport-Solagro.
- Régional, C., & UGCPA-BM (2013, Mars 2013). [Contrat d'activité entre Conseil Régional et L'Union des Groupements pour la Commercialisation des Produits Agricoles de la Boucle du Mouhoun (UGCPA-BM) pour La construction de deux cent biodigesteurs dans la région de la Boucle du Mouhoun].
- Rwigema, A. (2015). *Final report : a scientific comparative performance study of fixed dome masonry, fiber glass and flexbag biodigesters in Rwanda*. Retrieved from Kigali, Rwanda:
- Saint-Hyacinthe, V. d. (2016). Retrieved from <http://www.st-hyacinthe.qc.ca/services-aux-citoyens/biometthanisation.php>
- Sama, H., & Tiabri Thiombiano, S. (2012). Le biogaz à des fins domestiques. Burkina Faso: Institut de la Francophonie pour le développement durable (IFDD).
- Sandwidi, G. (2016) *Entretien personnel*. n. p., s. 1.
- Singh, R. P., Kumar, S., & Ojha, C. S. P. (1999). Nutrient requirement for UASB process: a review. *Biochemical Engineering Journal*, 3(1), 35-54. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S1369-703X\(98\)00043-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1369-703X(98)00043-6)
- Valorga, I. (2016). La Valorisation optimale des déchets organiques. Retrieved from <http://www.valorgainternational.fr/fr/>
- Van Brakel, J. (1908). *The Ignis Fatuus of biogas; small-scale anaerobic digesters ('biogas plants'): a critical review of the pre-1970 literature*: Delft University Press.
- Zaher, U., Cheong, D.-Y., Wu, B., & Chen, S. (2007). Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste. *Department of Biological Systems Engineering, Washington State University*.
- Zhang, L., Lee, Y.-W., & Jahng, D. (2011). Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. *Bioresource Technology*, 102(8), 5048-5059. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.082>