

TECHNIQUE

HELMO
Haute Ecole
Libre Mosane

Gramme

Travail de Fin d'Études

en vue de l'obtention du grade de

Master en Sciences de l'Ingénieur Industriel

Finalité : **Génie Énergétique Durable**

Développement et construction d'une unité mobile de biométhanisation pour le site lacustre de Ganvié

Mémoire présenté par

Martin MOISSE

Défense publique le
23 janvier 2020

Tuteur Gramme

Christian CHARLIER

Chargé de cours

Tuteur Entreprise

Basile KOUNOUHEWA

Directeur du Laboratoire

**Université d'Abomey-Calavi, Faculté des
Sciences et Technique** 01 BP 526 Cotonou, Bénin



CAMPUS
de l'OURTHE

Abstract

L'accroissement de la qualité de vie des populations rurales du Bénin passera par une amélioration de l'accès à l'énergie pour ces populations et la préservation de leur environnement. Aujourd'hui, le premier poste de consommation énergétique d'une famille rurale béninoise est la cuisine. Le combustible utilisé, le plus souvent du bois, induit une forte pression sur l'écosystème.

Dans les villages lacustres du lac Nokoué, les déchets organiques sont déversés dans le lac, nuisant à la qualité de l'eau et à la qualité de vie des habitants. Cet apport de matière organique permet à la jacinthe d'eau, une plante invasive, de se multiplier rapidement jusqu'à recouvrir une grande partie du lac et bloquer le transport marchand.

De ces constats est né le projet de créer une unité de biométhanisation hors sol permettant à la fois de valoriser les déchets organiques des ménages des cités lacustres et la jacinthe d'eau. Cette unité permet la transformation de ces intrants en biogaz qui sert à la cuisine quotidienne des ménages.

Dans ce travail, un prototype pour milieu lacustre a été dimensionné, construit et installé. Ce prototype servira aussi aux étudiants de l'université d'Abomey-Calavi pour de futures expérimentations sur la production de biogaz et la valorisation du digestat, coproduit de cette installation. Ce dernier, reminéralisé, peut être utilisé comme amendement en agriculture mais aussi comme provende pour les animaux.

L'unité de biométhanisation à cuve renversée construite lors de ce travail traite un volume de matière de 1,3 m³ alors que le volume de biogaz qui peut être stocké est de 1 m³. Ce qui permet de fournir un volume de gaz correspondant aux besoins d'une famille.

Mots clefs : méthanisation, digesteur mobile, digesteur à cuve renversée, énergie renouvelable, milieu lacustre, biogaz, Bénin

Abstract

A better energy supply for rural population in Benin and the preservation of their environment lead to increase their quality of life. Nowadays, the main energy consumption of a rural family is for cooking and the fuel used, wood in most cases, leads to a high environmental pressure.

In lacustrian towns on the Nokoué lake, organic waste is discharged in the lake, harming water quality and quality of life of the inhabitants. This organic matter inlet feeds the water hyacinth, an invasive plant. It increases the growth rate of the plant until water hyacinth covers a big part of the lake, obstructing commercial transport.

To meet these concerns, the project of creating a mobile biomethanisation unit is born. This unit can transform organic waste and water hyacinth into biogas for cooking.

In this work, the unit has been designed, built and installed in the lacustrian town of Ganvié. The prototype will be also used by the students of Abomey-Calavi University for future experimentations about biogas production and the valorization of the digestate, coproduct of this installation. This last one is a residue partially mineralized which can be used as a fertilizer or to feed animals.

A biomethanisation unit with an inverted tank as been built during this work. The volume of the organic matter digested is 1,3 m³ while the gas volume is 1m³ maximum. This system is linked to a cooking burner.

Key words : methanisation, mobile digester, inverted tank digester, renewable energy, lacustrian environment, biogas, Benin

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma reconnaissance envers les Professeurs de l'Université d'Abomey-Calavi. Tout particulièrement le Professeur Basile Kounouhewa qui a accepté d'être mon tuteur ainsi que les Professeurs Clément Kouchade et Gabin Koto N'Gobi.

Merci à l'équipe des étudiants de la licence en Energies Renouvelables et Systèmes Energétiques de l'Université d'Abomey-Calavi dont Roland, Fataï, Gisèle et Blaise. Je remercie aussi Alfred Dohou et lui souhaite bonne chance pour la suite du projet.

Je tiens aussi à remercier Mme Anne-Michèle Janssen pour la mise en place du programme de coopération qui lie l'Institut HELMo Gramme et l'Université d'Abomey-Calavi.

Il est maintenant temps d'exprimer ma gratitude vis-à-vis de Mr Christian Charlier pour avoir accepté d'être mon tuteur de stage, pour m'avoir suivi, soutenu ainsi que pour nos échanges réguliers.

Enfin, je remercie Elise pour sa patience, ses relectures attentives et ses précieux conseils. Merci aussi à ma maman et mes proches pour leur soutien indéfectible.

Préface

Ce travail de fin d'études d'ingénieur industriel spécialisé en génie énergétique durable a été réalisé en collaboration avec l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin. Il s'inscrit dans le prolongement direct du travail effectué par Hugo Huchant au second quadrimestre de l'année académique 2018-2019.

En observant le biodigester déjà construit, quelques constats ont été faits. Le premier est que l'utilisation du biodigester avec un coussin de stockage nécessite beaucoup d'opérations. Le second constat est que la surface occupée par le biodigester et son coussin de stockage est importante. Ces constats montrent que l'utilisation d'une telle installation en milieu lacustre n'est pas optimale. Un autre modèle de biodigester a donc dû être mis en place.

Le modèle ARTI, décrit au chapitre 4, un biodigester à cuve renversée, a été choisi comme architecture de base pour ce travail. Il se compose d'une cuve basse recevant les déchets organiques et d'une cuve supérieure retournée stockant le biogaz.

Grâce aux différentes données collectées auprès des habitants des cités lacustres et dans diverses études, il a pu être démontré que la quantité de déchets organiques des ménages est suffisante que pour produire le gaz nécessaire à la cuisine quotidienne.

Le biodigester a alors pu être dimensionné et construit. Il a ensuite été installé dans un hôtel situé à Ganvié, une cité lacustre située dans la commune de Sô-Ava, dans le Nord du lac Nokoué lui-même au Nord de Cotonou.

En conclusion, le prototype a été installé et inoculé. 4 semaines après le début de l'inoculation, le gaz produit contenait 57% de CH₄, 37% de CO₂ et 0,4 % d'O₂. Après 2 semaines, un pic de 670 ppm de H₂S a été atteint. Depuis lors, cette concentration chute continuellement et était de 115 ppm 4 semaines après l'inoculation. Il s'agit maintenant de poursuivre les expérimentations en valorisant les déchets de cuisine, la jacinthe d'eau et les déjections humaines.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Objectifs du projet	2
3. Contexte général	3
3.1. Le Bénin.....	3
3.1.1. Situation géographique	3
3.1.2. Situation économique	4
3.1.3. Situation politique	5
3.2. Les villages lacustres de la commune de Sô-Ava	6
3.2.1. Géographie et climat	6
3.2.2. Vie quotidienne à Ganvié	8
3.3. L'énergie et les enjeux du biogaz au Bénin et en Afrique.....	12
3.3.1. Le biogaz au Bénin.....	12
3.3.2. Enjeux liés au biogaz et situation énergétique de l'Afrique	15
3.4. La biométhanisation	18
3.4.1. Principe	19
3.4.2. Les étapes de transformation : de la matière organique au biogaz	19
3.4.3. Les caractéristiques physico-chimiques du biodigesteur et leur influence.....	20
3.5. Les biodigesteurs de surface	23
3.5.1. Le biodigesteur de l'UAC.....	24
3.5.2. Le biodigesteur ARTI.....	25
3.6. La jacinthe d'eau	26
3.6.1. Feuille d'identité et conséquences environnementales	26
3.6.2. Valorisation de la jacinthe d'eau.....	27
3.6.3. La jacinthe d'eau dans le la Nokoué	28
4. Installation du biodigesteur ARTI à Ganvié	29

4.1.	Identification d'un lieu d'installation	29
4.2.	Identification des intrants	29
4.2.1.	Déchets de cuisine	29
4.2.2.	La jacinthe d'eau	30
4.2.3.	Déchets de toilettes.....	32
4.3.	Dimensionnement du biodigesteur.....	33
4.4.	Choix des cuves.....	34
4.5.	Choix des tuyaux PVC	35
4.5.1.	Le PVC	35
4.5.2.	Le PVC pression	35
4.5.3.	Impact de la température	36
4.5.4.	Choix des diamètres	36
4.5.5.	Résistance chimique	36
4.5.6.	Choix des tuyaux.....	37
4.6.	Construction du prototype	37
4.7.	Logistique et installation.....	38
4.8.	Lancement de la production de biogaz	39
4.9.	Suivi de l'inoculation du biodigesteur.....	39
4.10.	Pression du biogaz en fonction de la hauteur de la cuve supérieure	41
4.11.	Prix du prototype et améliorations.....	44
4.12.	Gain économique pour l'utilisateur	45
4.13.	Suite du projet.....	46
5.	Travaux supplémentaires	47
5.1.	Choix d'un analyseur de biogaz.....	47
5.1.1.	Comparaison des analyseurs de gaz et choix d'un appareil	47
5.1.2.	Présentation de l'IRCD 4.....	50
5.2.	Valorisation du digestat	51

5.2.1.	Séchage solaire.....	51
5.2.2.	Utilisation comme engrais	58
5.3.	Design d'un filtre expérimental	60
5.3.1.	Objectifs du filtre	60
5.3.2.	Design général.....	61
5.3.3.	Filtre à H ₂ S.....	62
5.3.4.	Filtre à CO ₂	64
5.3.5.	Design du filtre.....	67
5.3.6.	Filtre à H ₂ O.....	69
5.3.7.	Indicateurs pour le changement du filtre	70
5.4.	Assainissement des eaux par la phytoépuration.....	70
5.4.1.	Problématique	70
5.4.2.	Principe de fonctionnement	71
5.4.3.	Adaptation de la méthode au milieu lacustre.....	73
5.4.4.	Dimensionnement	73
5.4.5.	Entretien.....	74
6.	Conclusion.....	76
	Lexique	77
	Bibliographie.....	78
	Annexes	82
1.	Estimation de la quantité de soufre récupérable lors de la régénération du filtre à H ₂ S.....	82
2.	Manuel de construction du biodigesteur ARTI	84
1.	Introduction	85
2.	Liste du matériel	85
2.1.	Matériaux	85
2.2.	Outils et autres	87
3.	Au préalable	87

4.	Préparation des cuves.....	87
4.1.	Matériel.....	87
4.2.	Outils	87
4.3.	Mode opératoire	88
4.4.	Remarques	88
5.	L'alimentation	88
5.1.	Matériel.....	89
5.2.	Outils	89
5.3.	Mode opératoire	89
5.4.	Remarques	91
6.	Le tube de sortie du digestat.....	91
6.1.	Matériel.....	91
6.2.	Outils	92
6.3.	Mode opératoire	92
6.4.	Remarques	93
7.	Le circuit de gaz	93
7.1.	Matériel.....	93
7.2.	Outils	94
7.3.	Mode opératoire	94
7.4.	Remarques	95
8.	Structure de maintien de la cuve retournée	95
8.1.	Matériel.....	95
8.2.	Outils	95
8.3.	Mode opératoire	96
8.4.	Remarques	97
9.	Essais d'étanchéité.....	97
9.1.	Etanchéité à l'eau	97

9.2.	Etanchéité à l'air.....	97
10.	Lancement du biodigesteur	97
11.	Utilisation du biodigesteur	98
3.	Datasheets des analyseurs de gaz	99
3.1.	Gembio	99
3.2.	Gasboard 3200 L.....	101
3.3.	Gasboard 3200 plus.....	102
3.4.	IRCD 4.....	104
4.	Tâches à réaliser à la suite du projet.....	106
1.	Achat d'appareils de mesure	106
2.	Gestion du digestat sur le site de Ganvié.....	106
3.	Traitement des déchets de cuisine sur le site de Ganvié.....	107
4.	Broyage des déchets.....	107
5.	Création d'un piège à eau.....	108
6.	Mise en place d'une station flottante.....	108
7.	Modification à effectuer lors de la vidange du biodigesteur.....	108
8.	Etude du pouvoir méthanogène d'un matériau.....	109
9.	Caractérisation et valorisation du digestat	109
10.	Raccordement des toilettes de l'hôtel au biodigesteur.....	109

1. Introduction

Le Bénin est un pays qui se développe et se questionne sur ses besoins énergétiques car il possède peu de ressources énergétiques combustibles autre que le bois et doit donc importer beaucoup. L'aspect environnemental entre aussi en jeu, ce qui amène une source de réflexion supplémentaire.

Dans le monde occidental du XIXème et du XXème siècles, le développement des sociétés a nécessité de grandes quantités d'énergie. L'utilisation des énergies fossiles, d'abord le charbon, ensuite le pétrole et le gaz ont permis de fournir cette énergie. Aujourd'hui, au vu des changements climatiques en cours, cette voie de développement est remise en question et n'est plus considérée comme viable. Il est dès lors nécessaire de trouver un chemin alternatif crédible qui doit aussi permettre aux populations des pays émergents de voir leur qualité de vie s'améliorer.

Lors de la mise en place de projets dans cette Afrique en plein développement, on remarque l'influence de beaucoup d'acteurs étrangers comme la Chine ou l'Europe. En effet, les grands travaux (bâtiments, installations industrielles,...) sont menés par des entreprises étrangères. Le savoir est étranger, la main d'œuvre est africaine.

Pour faire face à ce phénomène, la transmission du savoir et la responsabilisation des acteurs locaux doivent être une priorité. Ce projet n'est donc pas simplement le développement d'un moyen pour palier à un manquement mais surtout un outil d'émancipation pour que des acteurs locaux puissent gérer leur propre développement de A à Z et mettre en place une activité économique à haute valeur ajoutée pour les populations.

Le Bénin doit aussi faire face à la gestion de ses déchets. De ce contexte général et de ces défis est né l'idée de faire des déchets organiques une source d'énergie renouvelable : le biogaz. Il est une alternative possible et crédible pour ces pays émergents. La mise en place d'unités de biométhanisation dans les communautés africaines peut être un levier de développement et d'émancipation énergétique.

2. Objectifs du projet

Ce travail s'inscrit dans le prolongement de celui effectué du mois de février au mois de mai 2019 par Hugo HUCHANT à l'université d'Abomey-Calavi, située au Bénin, et intitulé « Contribution au développement d'une unité mobile de biométhanisation à usage domestique au Bénin ». Il s'agira d'assurer la continuité de ce projet tout en atteignant d'autres objectifs dont le principal est l'installation d'une unité pilote de biométhanisation en milieu lacustre.

Le projet d'une installation de biogaz en milieu lacustre au Bénin n'est pas anodin. Premièrement, la situation géographique et le climat du Bénin offrent des conditions favorables à la production de biogaz. Si le besoin de traitement des déchets organiques et l'épuration des eaux usées (toilettes et cuisine notamment) est une problématique générale, elle l'est d'autant plus pour les cités lacustres qui n'ont ni accès à un réseau d'égouts ni à un centre de tri des déchets ou d'enfouissement des déchets organiques. Ces effluents sont donc directement rejetés dans les lacs. Il est dès lors primordial de fournir des moyens d'assainissement qui permettront la préservation de l'environnement et de la qualité de vie des habitants. L'installation d'un biodigesteur est la solution qui sera étudiée ici. Celui-ci permettra, en plus d'éviter le rejet des déchets organiques dans les eaux du lac, de fournir du gaz pour la cuisine quotidienne. Une fois inoculé, il sera aussi possible de valoriser la jacinthe d'eau, une plante invasive qui met en péril les populations de poissons et *a fortiori* les activités de pêche, principales sources de revenus de ces populations.

Après l'installation de l'unité pilote, d'autres travaux suivront celui-ci. Ils porteront notamment sur la caractérisation et la valorisation du digestat, la production d'électricité à partir de groupes électrogènes fonctionnant au biogaz, la production de biogaz à partir de différents intrants, le raccordement des toilettes à un biodigesteur accompagné d'une étude du digestat pour ce type d'intrant...

3. Contexte général

3.1. Le Bénin

Pour introduire ce travail, il est intéressant d'en apprendre un peu plus sur le Bénin. La situation géographique du pays, l'état des lieux de l'économie et l'histoire politique récente du pays seront abordés brièvement. Ceci en complémentarité avec la description qu'il est possible de trouver dans le travail de Hugo Huchant (réf. (1)).

3.1.1. Situation géographique¹

Le Bénin (voir Figure 1) est situé en Afrique de l'Ouest dans la zone tropicale entre l'équateur et le tropique du Cancer. Il est limité au nord par le Niger, au nord-ouest par le Burkina Faso, à l'ouest par le Togo, à l'est par le Nigeria et au sud par l'océan Atlantique.



Figure 1: Situation géographique du Bénin [Réf. (1)]

Le Bénin possède deux types de climat :

- Au sud, un climat équatorial avec une forte humidité et une alternance de saisons sèches (de novembre à mars et de mi-juillet à mi-septembre) et de saisons des pluies (d'avril à mi-juillet et de mi-septembre à octobre).
- Au centre et au nord, un climat tropical avec une saison sèche de novembre à avril et une saison des pluies de juin à septembre.

¹ [Réf. (4), (5), (1), (6), (24)]

Si une grande partie de la population vivait autrefois en milieu rural, le développement économique des grandes villes a provoqué un exode rural comme nous avons pu l'observer en Europe lors de la 1^{ère} révolution industrielle. Néanmoins, plus de 50% de la population vit toujours dans ces zones, encore moins bien desservies en énergies fossiles et en électricité que les zones urbaines. Les villes principales sont Cotonou, Porto-Novo, Ouidah, Abomey et Parakou. Seule Parakou se situe au centre du Bénin, toutes les autres villes se trouvent dans le Sud.

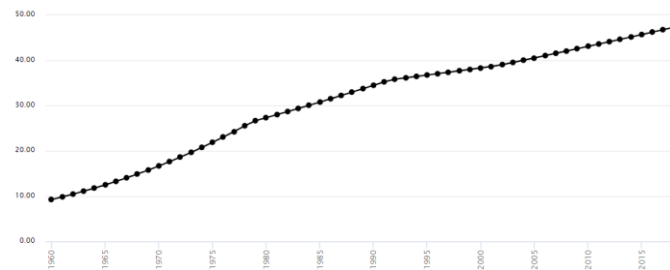


Figure 2: Population urbaine (% de la population totale) au Bénin [Réf. (2)]

3.1.2. Situation économique²

Le Bénin enregistre une croissance économique soutenue (6% en 2018), fruit des investissements publics en lien avec le Programme d'Action Gouvernemental 2016-2021 (PAG). Un autre facteur de croissance est la reprise de l'économie nigériane, pôle économique de la région et voisin du Bénin. Enfin, les réformes du gouvernement actuel ont permis de rendre les investissements publics plus efficaces en modernisant l'administration fiscale et en s'attaquant à un problème clef : la corruption.

Comme nous l'avons vu ci-dessus, une grande partie de la population vit encore en milieu rural. Les statistiques de répartition des travailleurs dans les différents secteurs d'activité (voir Figure 3) indiquent qu'une grande partie de celle-ci vit encore de l'agriculture.

Répartition de l'activité économique par secteur	Agriculture	Industrie	Services
Emploi par secteur (en % de l'emploi total)	42,4	18,6	38,3
Valeur ajoutée (en % du PIB)	23,0	21,5	46,9
Valeur ajoutée (croissance annuelle en %)	7,3	10,5	3,6

Figure 3: Répartition de l'activité économique par secteur [Réf. (1)]

Du point de vue du classement relatif à l'Indicateur de développement humain (2018), le Bénin se classe au 163^{ème} rang mondial et au 30^{ème} en Afrique (les Seychelles, l'île Maurice et

² [Réf. (21)]

l'Algérie occupe les trois premières places, le Burkina Faso est 46^{ème} et le Niger clôt ce classement). Le PIB annuel par habitant y est de 923\$.

3.1.3. Situation politique³

L'histoire politique contemporaine du Bénin peut être divisée en trois temps majeurs à savoir le temps de l'instabilité politique, le temps militaro-marxiste et le temps du Renouveau démocratique. Après son indépendance reconnue officiellement le 1^{er} août 1960, le Bénin, alors appelé Dahomey, connut une période d'instabilité politique où les coups d'état et les présidents se succédèrent durant une dizaine d'années. A la fin de l'année 1972, l'armée, avec à sa tête Mathieu Kérékou, s'empare du pouvoir. En 1975, le gouvernement militaire fait des choix stratégiques et idéologiques décisifs : le pays est rebaptisé République populaire du Bénin et proclame son adhésion à l'économie socialiste d'orientation marxiste-léniniste. Près de 15 ans plus tard, en banqueroute, l'Etat convoqua une Conférence nationale à laquelle un demi-millier de délégués prirent part pour repenser le fonctionnement du pays. Le système communiste est abandonné, le libéralisme économique et politique est instauré ainsi que la démocratie et l'Etat de droit. Les 3 pouvoirs sont séparés.

Aujourd'hui, le Bénin est vu par la communauté internationale comme un exemple de démocratie. En effet, aucun président ne s'est permis de modifier la Constitution pour briguer de mandat(s) supplémentaire(s), les élections sont organisées de manières transparentes, des débats télévisés sont mis en place et le passage du pouvoir en place à l'opposition en 2016 s'est fait presque sans heurts. Sur le plan de liberté, le pays est un modèle pour l'Afrique de l'Ouest, comme le sont aussi le Sénégal ou le Ghana par exemple (voir Figure 4).

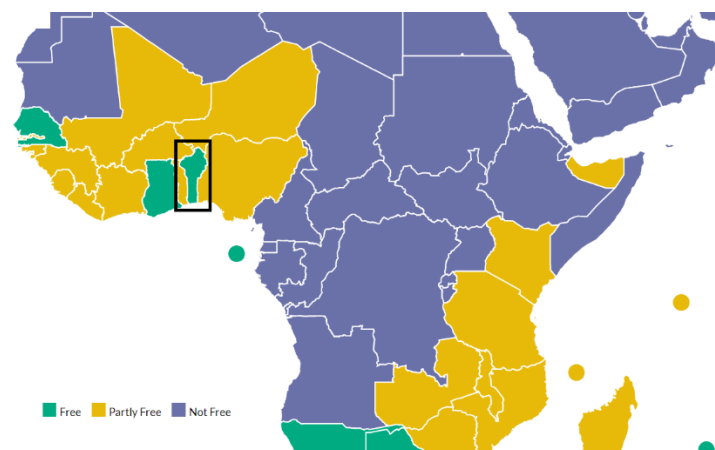


Figure 4: Carte des libertés (Afrique) [Réf. (3)]

³ [Réf. (3), (25)]

3.2. Les villages lacustres de la commune de Sô-Ava

Après avoir introduit brièvement différentes facettes du Bénin, il est important de présenter la commune de Sô-Ava. En effet, c'est dans un des villages de cette commune, Ganvié, qu'une unité pilote de production de biogaz sera testée. Une grande partie des habitants de cette commune vivent sur pilotis, ce qui induit des contraintes dans la vie quotidienne, notamment par rapport à l'approvisionnement en combustible. Nous détaillerons ce mode de vie particulier pour mieux cerner les problématiques auxquelles sont confrontés ces habitants ainsi que pour identifier les ressources qui sont à notre disposition afin de proposer des solutions adaptées.

3.2.1. Géographie et climat

En plus des quelques cours d'eau qui traversent le pays, Le Bénin compte aussi plusieurs plans d'eau dans le sud à savoir le lac Nokoué, où se situe Sô-Ava, le lac Ahémé et la lagune de Porto-Novo. Au Nord du lac Nokoué et le long de la rivière de la basse Sô, on retrouve la commune de Sô-Ava. Cette commune a comme particularité de compter plusieurs villages sur pilotis dont celui de Ganvié qui est le plus connu (entouré sur la Figure 5). Cette commune comptait 118 547 habitants lors du recensement de 2013 et on estime que la moitié d'entre eux vivent sur pilotis.

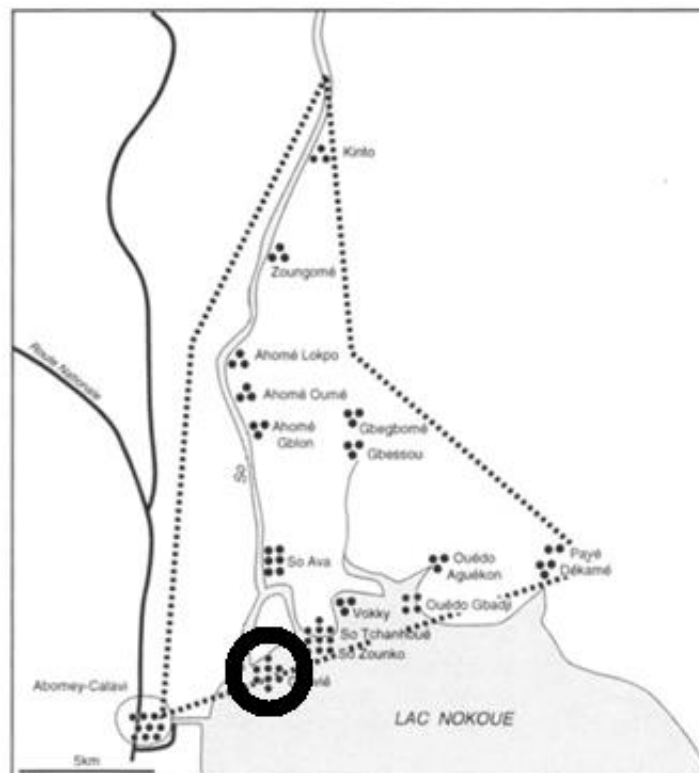


Figure 5: Carte de la commune de Sô-Ava [Réf. (4)]

À Sô-Ava, les températures ont une faible amplitude annuelle : les températures moyennes varient de 25,6 à 29°C. La pluviométrie annuelle y est de 1187mm (voir Figure 6). Comme nous le verrons plus tard, ces conditions climatiques sont particulièrement intéressantes pour la production de biogaz.

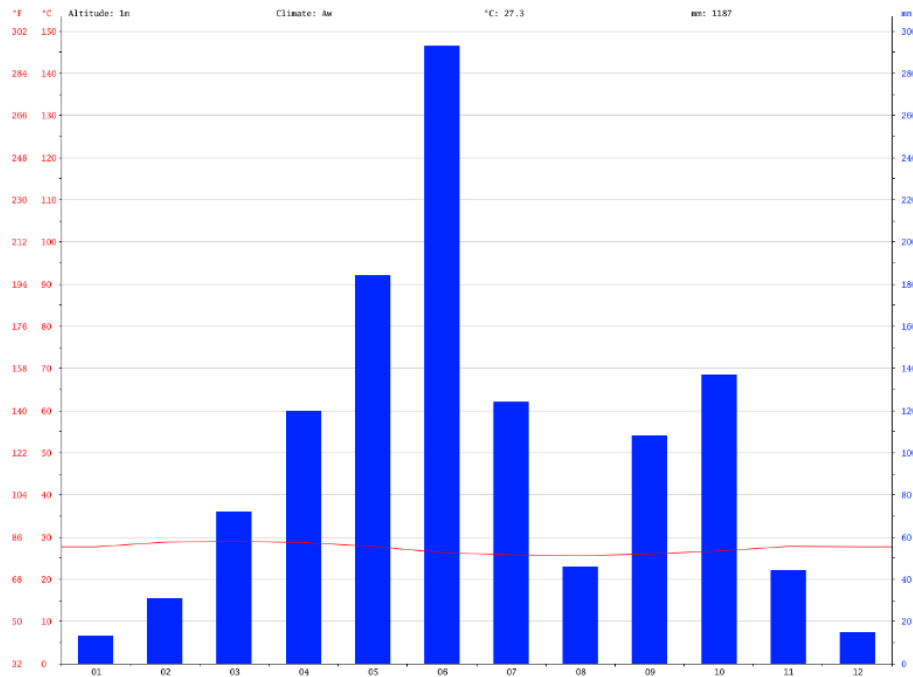


Figure 6: Diagramme climatique de Sô-Ava [Réf. (5)]

Le lac Nokoué est relié à l’océan Atlantique par un chenal de quelques kilomètres qui traverse la ville de Cotonou (voir Figure 7). Lors de la saison sèche, le débit des rivières qui l’alimentent diminue, le niveau du lac baisse et l’eau de l’océan se mêle à l’eau du lac *via* ce chenal. L’eau du lac, douce durant la saison des pluies, devient alors plus saumâtre. Cela modifie considérablement la faune et la flore du lac.

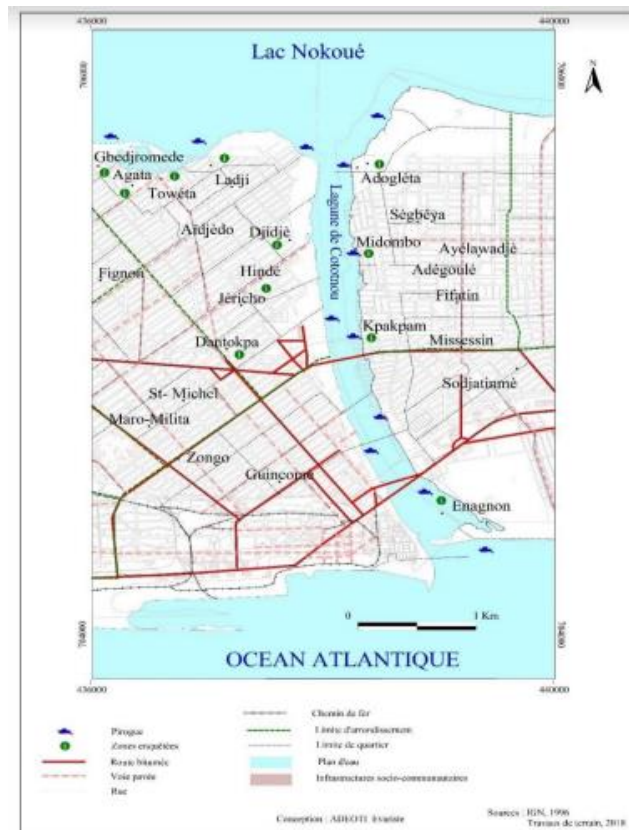


Figure 7: Carte de la lagune de Cotonou [Réf. (6)]

3.2.2. Vie quotidienne à Ganvié

3.2.2.1. La pêche

La majeure partie des habitants des villages lacustres pratiquent une activité liée à la pêche. Les hommes et leurs fils entament la pêche avant l'aube. La pêche à l'épervier est la plus répandue. Elle consiste en l'utilisation d'un filet rond, lestés avec des plombs, dont les pourtours sont ramenés vers l'intérieur pour former des poches. Le pêcheur est relié à son filet par une corde attachée au centre du rond. Une fois lancé en l'air, le filet se déploie comme les ailes d'un épervier avant de retomber dans l'eau et de piéger les poissons. Le pêcheur tire alors le filet afin de remonter les poissons qui seraient piégés dans les poches (voir Figure 8). D'autres pêcheurs pratiquent aussi la pisciculture traditionnelle. Des branches de palmes sont plantées dans la vase proches les unes des autres afin de former un enclos. Ensuite, les pêcheurs placent des tilapias dans cet espace. Les algues et les végétaux qui se fixent aux branches de palmes et les insectes qu'ils attirent constituent la nourriture des tilapias. Après 2 à 3 mois, un filet est placé au fond de l'élevage et les poissons sont capturés.



Figure 8: Démonstration de pêche à l'épervier

Après la capture des poissons, dès 4h du matin, les hommes se rendent sur la place principale de leur village afin de vendre ceux-ci aux femmes. Ensuite, celles-ci effectuent en pirogue les 8 km qui les séparent de la terre pour vendre leur marchandise au marché aux poissons de Calavi-Kpota. L'argent gagné leur permettra d'acheter des denrées alimentaires ou d'autres marchandises (tissus, bois de cuisine, bouteilles en plastique...) qu'elles ramèneront ensuite sur le marché de leur village.

3.2.2.2. Autres activités économiques

Outre la pêche, on retrouve d'autres activités créatrices de valeur. Une partie croissante de la population tire notamment ses revenus du tourisme. Piroguiers, guides, hôteliers, vendeurs de souvenirs et artistes sont autant de métiers qui se sont développés avec son essor.

Le prix élevé de l'essence, les revenus bas, la proximité du Nigéria, directement accessible par le lac, et la surveillance des frontières terrestres par les autorités nigérianes ont fait germer dans l'esprit de certains Toffins (le nom des habitants des villages lacustres) l'idée de se lancer dans la contrebande d'hydrocarbures. Aujourd'hui, les villages lacustres sont devenus les plaques tournantes de ce trafic. La nuit, des barques d'une trentaine de mètres se dirigent vers le Nigéria, chargées de bidons vides en plastique jaune. Avant l'aube, celles-ci seront revenues au Bénin chargées de l'or noir nigérian. Accroître le niveau de vie et la quantité d'argent disponible des ménages permettrait de diminuer l'intérêt de la population pour cette pratique illégale.

3.2.2.3. Habitation

Les maisons sont généralement faites de bois mais certains bâtiments sont construits en béton sur des îlots artificiels. Les maisons en bois reposent sur des pilotis qui permettent aux Toffins

de rester au sec, même en cas de crue. Les pilotis sont changés lorsque leur fonction structurelle n'est plus assurée (voir Figure 9).



Figure 9: Maison de la francophonie et problème structurel

Une maison abrite en général une famille, à savoir 1 homme, sa ou ses femmes (de 1 à 3 généralement) et leurs enfants (5 par femme en moyenne). La construction sur pilotis demandant beaucoup de ressources et les revenus des familles étant peu élevé, les habitations familiales se constituent le plus souvent d'une ou deux pièces et d'un embarcadère (voir Figure 10).



Figure 10: Maisons sur pilotis

3.2.2.4. Cuisine

De manière générale, les Toffins souffrent de malnutrition. Les revenus issus de la pêche sont insuffisants pour acheter des fruits et légumes en quantité suffisante. Ils se nourrissent donc essentiellement de poissons et de féculents (riz, manioc, igname, maïs...). Pour cuisiner, ils utilisent des foyers rudimentaires alimentés avec du bois (voir Figure 11). L'absence de réfrigérateur et la chaleur rendent la conservation des aliments et des restes difficiles. Après discussion avec des familles, la quantité de déchets de cuisine ou de restes jetée varie de 2 à 3 seaux de 10 litres par jour et par famille.



Figure 11: Vente du bois au marché de Ganvié

3.2.2.5. Accès à l'eau

L'accès à l'eau potable se fait par le biais de forages. L'eau extraite est amenée jusqu'à la place principale *via* des conduites. Les habitants s'y rendent avec leur pirogue chargée de bidons afin de s'approvisionner. Lorsqu'une pompe tombe en panne, la réparation prend généralement plusieurs semaines. L'eau du lac, riche en microorganismes et salée durant une partie de l'année, ne convenant pas à un usage alimentaire, ces pompes sont vitales pour la population.

3.2.2.6. Accès à l'électricité

Contrairement à l'approvisionnement en eau qui se fait de manière centralisée, la production d'électricité est décentralisée. Les ménages qui bénéficient de revenus suffisants installent des panneaux photovoltaïques (voir Figure 12) qui permettront de recharger des batteries ou d'alimenter de petits électroménagers. Une fois la nuit tombée, les batteries servent aussi à alimenter des lampes.



Figure 12: Exemple d'installations photovoltaïques

Les ménages les plus riches et les hôtels possèdent également des générateurs fonctionnant au diesel.

3.2.2.7. Gestion des déchets

Dans les villages lacustres, on peut distinguer 2 manières de traiter les déchets. Tout d'abord, il faut se rendre compte que les déchets organiques et les déchets de toilettes sont jetés

directement dans le lac. Les rayons UV du soleil et les microorganismes présents dans le lac permettent la minéralisation de ces déchets qui se déposent dans le fond du lac. Les autres déchets (plastique, caoutchouc...) sont rassemblés sur des îlots de terre puis brûlés.

Si le traitement de ces 2 grandes familles de déchets pose question, nous nous intéresserons seulement à la problématique de la gestion des déchets organiques dans le cadre de ce travail.

3.2.2.8. Services

Dans la cité de Ganvié, principale village lacustre de la commune de Sô-Ava, on trouve 3 écoles (voir Figure 13), 1 collège, 1 maternité et plusieurs cliniques indépendantes. L'administration locale s'occupe quant à elle de résoudre les conflits de voisinage. Ces lieux peuvent être envisagés pour une unité de production si leur quantité de déchets organiques est suffisante.



Figure 13: Complexe scolaire de Ganvié

3.3. L'énergie et les enjeux du biogaz au Bénin et en Afrique⁴

Dans son travail, Hugo HUCHANT établit avec précision la situation énergétique du Bénin et les opportunités qui existent pour y installer des transformateurs d'énergies renouvelables. Ici seront détaillés le travail de certains acteurs locaux, la situation énergétique de l'Afrique, le lien entre approvisionnement énergétique et contexte géopolitique ainsi que les enjeux liés au biogaz au Bénin.

3.3.1. Le biogaz au Bénin

Contrairement au Burkina Faso et à d'autres pays africains, le Bénin ne possède pas de plan national pour le développement du biogaz. Cependant, des initiatives privées existent. Lors du stage, il m'a été possible de visiter certaines de ces installations. Ces visites ont été utiles et

⁴ [Réf. (9)]

enrichissantes, une brève présentation en est donc faite. Parmi ces initiatives privées, on retrouve :

- L'ONG Songhaï qui vise à former des jeunes à la pratique d'une agriculture intégrée permettant l'essor de villes rurales vertes. Le centre de Porto-Novo a pu être visité lors du stage.
- La SNV, une organisation néerlandaise active dans le développement des pays émergents. Celle-ci a formé en 2018 des maçons et des superviseurs à la construction de biodigesteurs enterrés.
- Le centre de valorisation des déchets de Toffo. Actif depuis 2018, il récupère les déchets organiques de la région pour en faire du biogaz. Ce centre n'a pu être visité lors du stage.
- Le Centre de Valorisation des Déchets en Energie Renouvelable et Agriculture (ValDERA) est un centre de recherche et de formation sur la valorisation des déchets. Il est lié à l'université d'Abomey-Calavi. Cinq tonnes de déchets provenant des habitations environnantes y sont envoyées chaque jour. La partie organique humide de ces déchets est valorisée sous forme de biogaz.

3.3.1.1. L'ONG Songhaï et le centre de Porto-Novo

Le centre Songhaï se situe à Porto-Novo, à 40km de Cotonou. Il a été créé en 1985 par le Frère Godfrey NZAMUJO⁵. Au début, il était destiné à apporter à de jeunes cultivateurs une formation en cycle long. Constitué de 1 seul hectare à ses débuts, il couvre aujourd'hui 22 hectares. D'autres centres ont été créés au Bénin, au Libéria, en Sierra Leone, au Congo-Brazzaville mais aussi et surtout au Nigéria où l'on retrouve aujourd'hui la majorité des centres. Dans chacun d'eux, on retrouve diverses activités portées essentiellement sur l'agriculture, l'élevage et la pisciculture. Le centre de Porto-Novo est aujourd'hui considéré comme le site expérimental de l'organisation. On y trouve la Songhaï Leadership Academy, une école qui a pour but de former les jeunes à essaimer le modèle Songhaï sur tout le continent. Un 3^{ème} pan de l'organisation appelé Songhaï Energy a été créé pour tout ce qui touche aux questions des énergies renouvelables et des systèmes intégrés. C'est à ce dernier pan de l'ONG que nous nous intéresserons tout particulièrement.

⁵ [Réf. (26)]

Le projet Songhaï Energy vise à décentraliser la production d'énergie qui est chère, complexe à gérer et inaccessible aux zones pauvres et enclavées. Songhaï Energy vise donc à la fois :

- une meilleure productivité
- une diversité dans la production énergétique (biogaz, éolien et solaire actuellement)
- une augmentation du pouvoir d'achat et de la capacité d'épargne et d'investissement

3.3.1.1.1. Le biogaz à Songhaï

Actuellement, tous les déchets organiques produits au sein du centre sont revalorisés. Outre le compostage, une grande partie d'entre eux sont utilisés pour produire du biogaz. On retrouve entre autres : de la jacinthe d'eau, de la fiente de poulet et de canard, des excréments de cochon et de moutons, des résidus de production de l'huile de palme (coque et huile « impure »), des déchets de cuisine, les parties non comestibles des récoltes (tiges de maïs, feuilles d'ananas...). Ces déchets sont broyés si besoin et insérés dans des digesteurs enterrés. Le biogaz obtenu est stocké dans des cuves couvertes de bâches ou bien purifié, comprimé à 9 bar et stocké dans des bonbonnes à gaz. Le gaz purifié servira à alimenter des groupes électrogènes en cas de besoin alors que le gaz non traité est directement utilisé pour la cuisine, par des lampes à gaz ou pour chauffer des préparations à des fins industrielles.

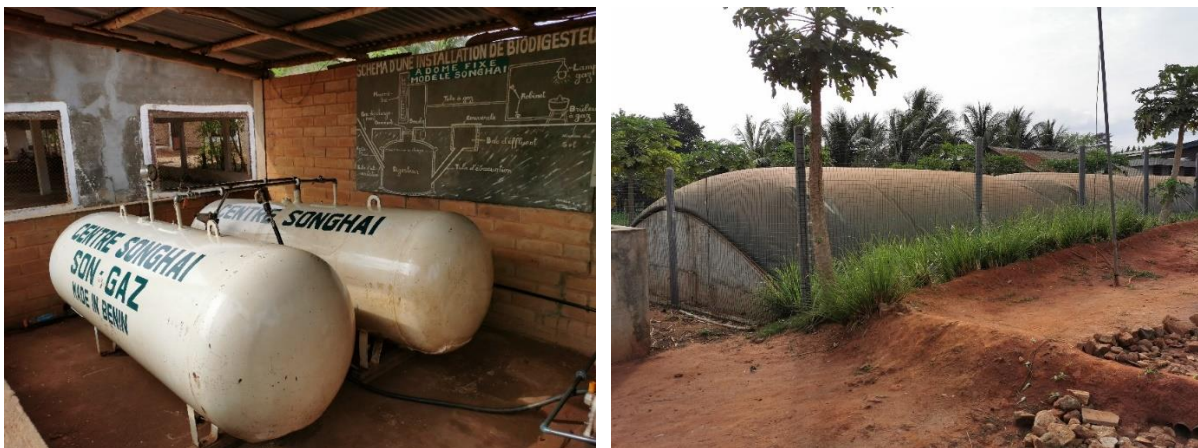


Figure 14: Stockage en bonbonnes et sous bâche

L'ONG développe par ailleurs des guides de bonnes pratiques relatifs à différents sujets dont celui du biogaz. Ce guide reprend les bases à connaître afin de mettre en place une installation de biogaz domestique enterrée. Il y est question de la construction, de l'alimentation et de l'entretien de ce type de biodigester.

3.3.2. Enjeux liés au biogaz et situation énergétique de l'Afrique

En dehors de l'Afrique du Nord et de l'Afrique du Sud, les populations africaines ont un accès restreint à l'électricité et aux énergies fossiles. Le bois représente le plus souvent leur principale source d'énergie.

La carte suivante donne une vision d'ensemble du taux d'électrification des différents pays d'Afrique ainsi que de la part de la population qui est dépendante de la biomasse traditionnelle, à savoir le bois.

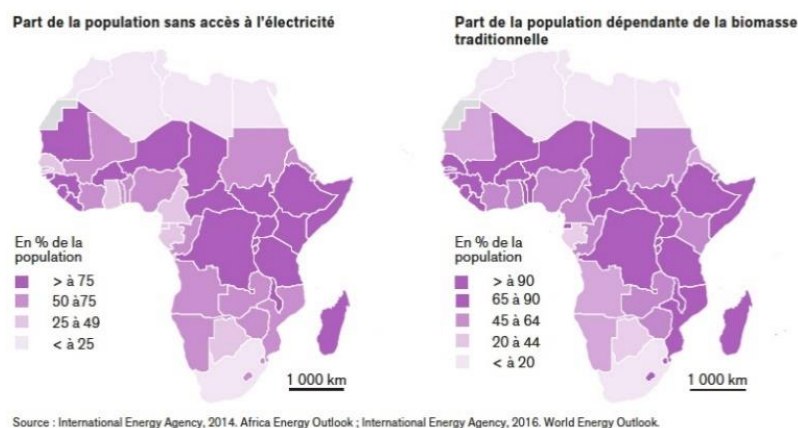


Figure 15: Taux d'électrification et dépendance à la biomasse traditionnelle en Afrique [Réf. (7)]

Pour le moment, les principaux vecteurs énergétiques utilisés en Afrique sont le pétrole, le gaz, le charbon et le bois. Si les 2 premiers sont des énergies fossiles, le bois fait partie du cycle court du carbone et peut donc être considéré comme une énergie durable. Cependant, la non-gestion des forêts et le déboisement intensif ne permettent pas le renouvellement du couvert végétal. Dans ce cas, le bois ne peut donc plus être considéré comme renouvelable puisqu'il n'est pas renouvelé : les émissions de CO₂ dues à sa combustion ne sont pas réabsorbées ou seulement partiellement par les cultures qui remplacent les arbres abattus.

Les principales zones d'extraction des combustibles fossiles sont le Nigéria, l'Angola et l'Afrique du Nord pour le pétrole et le gaz et l'Afrique du Sud pour le charbon. Les réseaux de distribution se cristallisent ensuite autour des grandes villes.

Il en est de même pour l'approvisionnement en électricité qui est basé sur la centralisation nationale des unités de production, le plus souvent des centrales au charbon, au pétrole ou au gaz (voir ci-dessous). Y sont associés des réseaux de distribution complexes, chers à entretenir et où les délestages intempestifs ne sont pas rares.

En conclusion, la majorité des zones isolées et enclavées ne sont pas desservies par ces réseaux énergétiques.

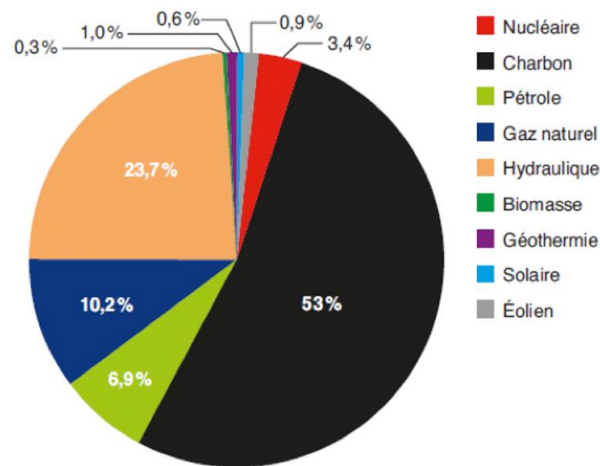


Figure 16: Mix électrique en Afrique subsaharienne (2016) [Réf. (1)]

Au vu des difficultés de s'approvisionner en énergie hors des grandes villes, les populations rurales utilisent donc le bois comme combustible lorsqu'il s'agit principalement de cuisiner.

Sur base de ces constats, le biogaz, qui peut être produit avec des installations rudimentaires, est une solution pour permettre aux populations isolées, enclavées ou bien simplement pauvres d'avoir accès à une source d'énergie. Il en est de même pour les populations urbaines qui peinent à gérer leurs déchets et qui, parallèlement, ont un besoin en énergie élevé pour leur développement. Outre cet accès à l'énergie et le développement de l'indépendance énergétique des communautés, d'autres enjeux peuvent être mis en avant. Ils sont développés dans la suite de ce chapitre.

3.3.2.1. Résilience aux changements géopolitiques

L'indépendance énergétique des communautés induit une résilience aux changements géopolitiques. Comme exemple, nous pouvons citer en octobre 2019 la fermeture des frontières avec le Nigéria, principal exportateur d'hydrocarbures de la région. Cela a entraîné un accroissement des prix des matières énergétiques. Cette augmentation des prix a un impact moindre pour les populations qui auraient substitué l'utilisation du biogaz à celle des hydrocarbures importés. Pour avoir un ordre d'idée de la fluctuation des prix, l'essence de contrebande se vendait à 350-375 CFA/litre (0,55€) à la fin du mois de septembre et a atteint le prix de 1000 CFA/litre (1,50€) à la mi-novembre. Son prix s'est ensuite stabilisé aux alentours de 550 CFA/litre (0,80€) au début du mois de décembre.

3.3.2.2. Traitement des déchets et assainissement des eaux

En février 2019, le gouvernement béninois a signé un accord avec l'entreprise COVED afin de mettre en place un système de ramassage et de traitement des déchets ménagers⁶. Cependant, cet accord s'applique seulement aux zones urbaines de Cotonou, Ouidah et Porto-Novo. Les zones rurales ne bénéficieront donc pas de cette collecte des déchets. Actuellement, les populations rurales vivant sur terre entassent leurs déchets puis, lorsque le tas devient trop volumineux, il est enflammé. Dans certaines zones, les déchets organiques sont compostés par les agriculteurs ou récupérés par des centres qui les transforment en biogaz comme à Toffo. Les populations rurales vivant sur pilotis incinèrent aussi leurs déchets ménagers non-organiques et jettent leurs déchets organiques directement dans l'eau dont les déjections humaines. Ceci pose des problèmes sanitaires notables dans ces villages lors de la saison sèche. En effet, l'eau saumâtre est trouble et ne permet pas aux UV du soleil d'assainir l'eau et il n'y a plus de végétaux sur le lac pour décomposer la matière fécale.

L'installation d'unités de biogaz dans ces villages terrestres ou sur pilotis doit permettre de traiter ces déchets organiques et humains. En gérant ces déchets, la qualité de l'eau ainsi que les conditions sanitaires seront améliorées.

3.3.2.3. Accès à l'éducation

Dans les foyers béninois, la tâche de faire la cuisine est attribuée à la femme. C'est aussi elle qui doit veiller à s'approvisionner en combustible pour mener à bien cette tâche. Si en milieu urbain les sacs de charbon et les bonbonnes de gaz se trouvent aisément, se fournir en bois en milieu rural demande un investissement en temps plus conséquent. En fonction de la composition du ménage, c'est la femme seule ou bien ses filles qui se rendront au marché pour acheter le bois qui servira à la cuisine.

Parallèlement, la coupe du bois est effectuée par les hommes, les jeunes du ménage y accompagnant leur père.

Pour l'instant, en milieu rural, l'emploi des enfants est nécessaire pour garantir l'approvisionnement énergétique de la famille. Le temps alloué à ces tâches ne l'est donc pas pour aller à l'école. Garantir l'approvisionnement énergétique en utilisant un biodigesteur devrait permettre aux enfants d'avoir plus de temps pour aller à l'école. Dans un pays où le taux d'alphabétisation, c'est-à-dire le pourcentage des habitants de plus de 15 ans qui savent lire et

⁶ Réf. (39)

compter, est de 38,4%⁷, l'accès à l'éducation est un enjeu majeur pour le développement du pays.

3.3.2.4. Préservation du couvert végétal

Nous avons déjà abordé succinctement ce problème. Les forêts exploitées ne sont pas gérées durablement, quand un arbre est coupé, aucun n'est replanté. S'en suit un appauvrissement du couvert végétal. Dans la lutte contre les changements climatiques, la lutte contre la déforestation est primordiale. Endiguer ce phénomène en substituant le biogaz au bois est une solution durable qui doit permettre, dans un premier temps, la diminution puis la fin de l'exploitation des forêts pour le bois de cuisine.

3.3.2.5. Problèmes sociaux liés à la collecte du bois

En lien avec le point ci-dessus, la raréfaction du couvert végétal entraîne une concentration des activités d'exploitation forestières. Des tensions apparaissent entre les tribus exploitant les mêmes forêts et des affrontements ont parfois lieu.

3.3.2.6. Amélioration des conditions de vie

En garantissant un approvisionnement en énergie aisé et bon marché, ces populations pourront allouer davantage de temps à d'autres activités et verront leurs dépenses énergétiques diminuer. En conséquence de ces 2 avantages, leur pouvoir d'achat augmentera et, si celui-ci est bien utilisé, leur niveau de vie aussi.

3.4. La biométhanisation

Les enjeux liés au biogaz en Afrique ont déjà été abordés. Nous nous focaliserons ici sur la biométhanisation d'un point de vue scientifique : qu'est-ce que la méthanisation ? Sous quelles conditions a-t-elle lieu ? Quelles sont les différentes méthodes de biométhanisation qui existent ? Quel est le potentiel méthanogène en fonction des intrants ? Ces informations seront exposées d'une manière synthétique mais permettant toutefois de bien comprendre les tenants et aboutissants de la biométhanisation. Pour en apprendre davantage sur la biométhanisation, celle-ci est documentée en profondeur dans le travail de fin d'études de Hugo Huchant⁸.

Lorsqu'il s'agira de parler de quantité de biogaz, nous utiliserons les normaux mètres cubes ou Nm³ (voir Lexique). Nous travaillons en effet le plus souvent à une pression proche de la

⁷ Réf. (38)

⁸ Réf. (9)

pression atmosphérique et la température ambiante est proche de celle utilisée pour le définir (5% de différence si la température du gaz est de 30°C).

3.4.1. Principe

La biométhanisation ou digestion anaérobie est un processus biochimique de décomposition de la matière organique dans un milieu dépourvu d'oxygène, dit anaérobie. Elle peut avoir lieu naturellement dans certains milieux, tels les marais, mais peut être appliquée volontairement par l'homme dans des unités appelées « (bio)digesteurs ». Ce processus est possible grâce à différentes familles de bactéries anaérobies ou quasi-anaérobies qui vont permettre de transformer la matière organique en biogaz par des étapes successives. Ces bactéries étant sensibles aux caractéristiques physico-chimiques régnant au sein du biodigester, celles-ci devront être étudiées avec soin. Outre le biogaz, un co-produit se crée lors de cette biométhanisation : le digestat. Ce digestat est un produit riche en humus, stabilisé et qui peut être utilisé comme fertilisant en agriculture. Le biogaz est constitué d'un mélange de méthane (CH_4), de dioxyde de carbone (CO_2), d'hydroxyde de soufre (H_2S), de vapeur d'eau (H_2O) et parfois d'autres substances en petites quantités tels que l'oxygène, des substances azotées ou les siloxanes qui sont des dérivés du silicium issus de la dégradation de produits cosmétiques.

3.4.2. Les étapes de transformation : de la matière organique au biogaz⁹

Pour obtenir du biogaz, la matière organique, composée de molécules chimiques complexes, va être décomposée par des bactéries lors de 4 phases successives. Chaque phase est propre à un type de bactérie (voir Figure 17).

⁹ [Réf. (8), (9)]

LES 4 ÉTAPES DE LA MÉTHANISATION

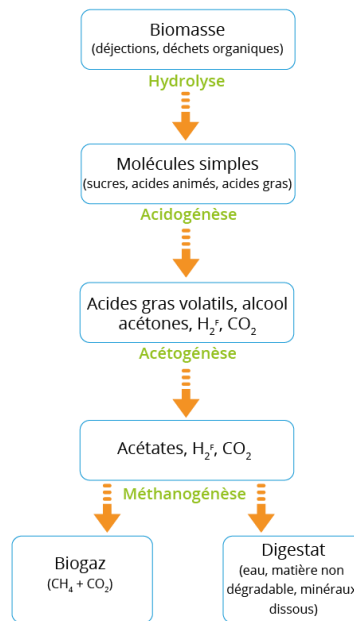


Figure 17: Les 4 étapes de la biométhanisation [Réf. (8)]

Passons ces étapes en revue :

- **Hydrolyse et acidogénèse** : lors de ces étapes, les chaînes organiques complexes (protéines, lipides, polysaccharides) sont transformées en composés plus simples (acides gras, peptides, acides aminés). L'hydrolyse est considérée comme la réaction limitante dans le processus de biométhanisation. Un broyage préalable et un pré-compostage des intrants permettent d'accélérer cette phase.
- **L'acétogénèse** : les produits de l'acidogénèse sont convertis en acide acétique (CH₃COOH).
- **La méthanogénèse** : L'acide acétique est transformé en méthane (CH₄) et en gaz carbonique (CO₂).
- **Autres réactions** : en dehors de ces étapes, les molécules non carbonées réagissent aussi. C'est pourquoi on retrouve d'autres substances dans le biogaz comme du H₂S ou des molécules azotées (NH₃ et NH₂) .
- Les résidus solides constitueront le digestat dans lequel on retrouve des substances azotées et phosphorées ainsi que du potassium en quantité variable selon les intrants utilisés.

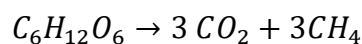
3.4.3. Les caractéristiques physico-chimiques du biodigesteur et leur influence

Le biogaz produit se compose de différents gaz dont les proportions varient légèrement en fonction des intrants utilisés et du temps de séjour de la matière. Le volume produit est lié à ces

mêmes facteurs mais aussi à la température qui règne dans le digesteur, au pH de la matière, à la teneur en eau ainsi qu'aux rapport Carbone/Azote et Carbone/Phosphore. Des substances toxiques ou la mauvaise qualité du réseau peuvent quant à elles annihiler la réaction de méthanisation.

3.4.3.1. La nature des intrants et la composition du biogaz

Les proportions des gaz qui composent le biogaz sont principalement liées à la nature des intrants utilisés. En effet, les déchets végétaux, composés essentiellement de fibres cellulosiques ((C₆H₁₀O₅)_n) et de glucose (C₆H₁₂O₆) se décomposeront selon la réaction suivante (exemple du glucose) :



Le biogaz obtenu aura alors une concentration de 50% de méthane et de 50% de CO₂. En ce qui concerne les graisses et les huiles, elles se composent d'un mélange d'acides essentiellement composés de carbone et d'hydrogène permettant d'obtenir une concentration en méthane allant jusqu'à 70%.

De manière générale, le tableau suivant présente la gamme de composition du biogaz produit dans la majorité des sites de production.

Type de gaz	Proportion
Méthane – CH ₄	50 – 75%
Dioxyde de carbone – CO ₂	25 – 45%
Hydroxyde de soufre – H ₂ S	50 – 8000ppm
Dioxygène – O ₂	0 – 1%
Vapeur d'eau – H ₂ O	Saturation physique

Figure 18: Composition du biogaz [Réf. (9)]

3.4.3.2. Le temps de séjour et la charge organique

La charge organique est la quantité de matière que l'on introduit dans le biodigesteur. Pour assurer un bon fonctionnement, on estime qu'elle doit être de 2 à 12 kg de matière organique par mètre cube et par jour selon les paramètres physiques du biodigesteur (décrits ci-dessous).

En lien avec cette variable, le temps de rétention hydraulique ou temps de séjour moyen permet de connaître le nombre de jours théoriques que la matière passera dans le biodigesteur. Un temps trop court aura pour conséquence de « lessiver » les microorganismes en les évacuant plus vite que ce qu'ils peuvent se reproduire ainsi que d'empêcher la matière organique de

libérer tout son pouvoir méthanogène. Si ce temps devient trop long, les microorganismes n'auront plus assez de matière à dégrader et leur population déclinera.

Soit CO la charge organique, α le facteur de dilution de la matière organique, V le volume liquide du digesteur et TRH le temps de rétention hydraulique, on peut relier ces variables par l'expression suivante :

$$TRH = \frac{V}{\alpha \cdot CO}$$

3.4.3.3. La température

La température qui règne au sein du biodigesteur influera sur le type de bactéries présentes dans le réacteur ainsi que sur leur activité et donc sur la cinétique de la réaction.

3 régimes de production peuvent être observés en fonction de la température du biodigesteur :

- Le régime psychrophile se produit entre 3 et 20°C. C'est dans cette plage de température que la réaction de méthanisation sera la plus lente. Le temps de rétention hydraulique devra être supérieur à 70 jours.
- Le régime mésophile a lieu lorsque la température se situe entre 20 et 40°C. Un optimal se situe entre 35 et 37°C, températures auxquelles les bactéries de ce régime sont les plus actives. La matière doit rester dans le biodigesteur minimum 30 jours
- Le régime thermophile est le régime le plus efficace pour produire du biogaz. En effet, un temps de rétention minimum de 15 jours suffit. Cependant, la température du biodigesteur doit être comprise entre 40 et 70°C, avec un optimum entre 60 et 63°C. Le biodigesteur doit donc être chauffé, ce qui en fait un régime peu efficient.

3.4.3.4. La teneur en eau

La digestion humide et la digestion sèche diffèrent par le pourcentage de matière sèche présente en entrée du biodigesteur. Dans le cas de la digestion humide, ce pourcentage sera de 10-15% en poids alors qu'il atteindra 20 à 40% pour la digestion dite sèche. Une grande concentration en matière sèche permet, pour un volume de production donné, d'utiliser un biodigesteur moins volumineux. Cependant, ce procédé nécessite un mélangeage continu ou discontinu afin d'éviter la formation d'une croûte qui empêcherait le biogaz de se dégager. La plupart des biodigesteurs domestiques fonctionnent par voie humide afin d'éviter ce genre d'appareillage.

3.4.3.5. Le pH

La transformation de la matière organique par les microorganismes entraîne des variations de pH au sein du biodigesteur. Ces variations, si elles sont trop importantes, sont dangereuses pour la survie de ces mêmes microorganismes. Le milieu tendant en général à devenir acide suite à l'acidogénèse, le pH doit être mesuré et maintenu au-dessus de 6,2 pour assurer le bon déroulement de la biodigestion. Des traitements à la chaux peuvent être envisagés dans le cas où le pH serait trop acide (mesure avec un pH-mètre).

3.4.3.6. La qualité du réseau

La qualité du réseau de gaz, c'est-à-dire son caractère hermétique, doit être assurée. Les fuites, en plus de diffuser le biogaz dans l'atmosphère, permettent aux molécules de dioxygène et de diazote présentes dans l'air de pénétrer dans le réseau de distribution. Le biogaz se voit donc mélangé à ces gaz, ce qui diminue son pouvoir calorifique. Par ailleurs, la présence d'une grande quantité d'air met en péril les bactéries méthanogènes anaérobies et donc la réaction de méthanisation.

3.4.3.7. Les rapports carbone/azote et carbone/phosphore

Outre les éléments chimiques essentiels à la fabrication du méthane (carbone et hydrogène), d'autres substances sont d'une importance capitale pour permettre aux microorganismes de se développer comme l'azote et le phosphore. Le rapport entre le carbone et ces 2 substances doit donc être tel que l'alimentation et la croissance des microorganismes puissent être assurés. Un rapport molaire C/N de 20 à 30 et C/P de 100 à 150 sont décrits comme idéaux¹⁰.

3.5. Les biodigesteurs de surface

Le biodigesteur est le réacteur dans lequel la matière organique va être transformée en biogaz et en digestat. Dans la plupart des installations domestiques rurales, le réacteur est enterré. Dans ce cas, un canal de refoulement et un canal d'alimentation relie celui-ci à la surface. Dans le cadre de ce projet, nous avons travaillé en milieu lacustre. La présence d'eau ne permet donc pas la mise en place d'un biodigesteur enterré. Seuls les biodigesteurs domestiques de surface ou hors sol sont donc étudiés. Ici seront présentés 2 biodigesteurs domestiques hors sol : le biodigesteur mis en place par Hugo HUCHANT lors de son travail ainsi que le biodigesteur ARTI (Appropriate Rural Technology Institute).

¹⁰ Réf. (23)

3.5.1. Le biodigesteur de l'Université d'Abomey-Calavi

Le biodigesteur expérimental de l'Université d'Abomey-Calavi est constitué d'une cuve de 1 m³, d'un tuyau d'entrée percé au centre de sa paroi supérieure, d'un tuyau de sortie de la matière situé à mi-hauteur sur une paroi latérale et d'un tuyau de sortie du gaz situé sur la paroi supérieure. Ce biodigesteur ne possède pas de stockage intégré suffisant. Le tuyau de sortie du biogaz doit donc être relié à un volume de stockage : une chambre à air ou un sac par exemple. Pour l'instant, un sac de 1 m³ est utilisé (voir Figure 19). Entre le biodigesteur et le volume de stockage un filtre rempli de limaille de fer a été ajouté afin de réduire la quantité de H₂S présente dans le gaz.



Figure 19: Cuve et Stockage du biodigesteur de l'UAC

Le désavantage majeur de cette installation est la nécessité de connecter la cuve à un volume de stockage. Ce volume de stockage nécessite qu'on lui accorde un espace ou bien il doit être fixé sur le biodigesteur. Un autre désavantage tient dans les différentes actions qu'il est nécessaire de réaliser pour cuisiner. En effet, l'utilisateur devra successivement :

- 1) Fermer la vanne de sortie du gaz du biodigesteur
- 2) Fermer la vanne d'entrée du sac
- 3) Déconnecter le sac
- 4) Raccorder le sac à l'alimentation du brûleur
- 5) Placer un objet volumineux sur le sac pour mettre le gaz sous pression
- 6) Ouvrir la vanne du sac tout en allumant le brûleur

- 7) Fermer la vanne du sac
- 8) Raccorder le sac au tuyau de sortie du biodigesteur
- 9) Ouvrir la vanne d'entrée du sac
- 10) Ouvrir la vanne de sortie du biodigesteur

En plus de ces opérations, il faut noter que le biodigesteur continue à produire du biogaz durant le temps où le sac est déconnecté. La pression augmente donc dans la cuve et une partie du liquide qu'elle contient est poussé vers l'extérieur.

Tous ces inconvénients nous indiquent qu'il est nécessaire de trouver une autre architecture afin de simplifier au maximum l'utilisation du biodigesteur. Un sac disposant d'une entrée reliée au biodigesteur et d'une sortie vers le brûleur peut être une solution afin d'éviter les inconvénients cités ci-dessus. Cette solution sera envisagée par les étudiants de l'UAC dans un travail ultérieur.

3.5.2. Le biodigesteur ARTI

Le biodigesteur ARTI (Appropriate Rural Technology Institute) a été développé en Inde par l'école technique du même nom. Il s'agit d'un biodigesteur à cuve renversée. C'est-à-dire que le biodigesteur est constitué de 2 cuves de tailles proches, que leur paroi supérieure est découpée et que la plus petite est retournée dans la seconde comme illustré sur la figure ci-dessous.

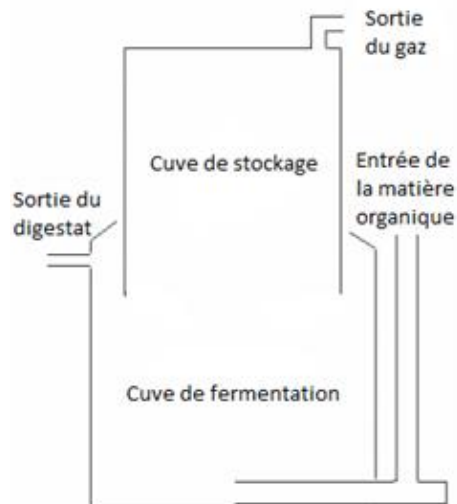


Figure 20: Schéma du digesteur ARTI [Réf. (10)]

L'avantage majeur de ce dispositif est que le stockage est directement intégré au biodigesteur. Le poids de la cuve supérieure permet en outre de fournir une pression suffisante pour que le gaz puisse atteindre un brûleur situé à quelques mètres. Pour parfaire cette installation, un piège à

eau peut être installé au point bas des tuyauteries afin d'éviter que l'eau présente naturellement dans le biogaz ne viennent se condenser puis boucher les tuyaux.

Malgré ces avantages, ce biodigesteur présente quelques désavantages vis-à-vis du biodigesteur mono cuve :

- un temps de construction plus long (découpage des 2 cuves et nécessité de construire une structure pour retenir la cuve supérieure)
- un prix plus élevé de 300 000 CFA (458€) contre 150 000 CFA (229€) pour le biodigesteur simple cuve

Le diamètre du tuyau d'alimentation et le broyage des intrants doivent permettre d'éviter la formation de bouchon. Il sera essentiel d'y veiller d'autant plus pour la jacinthe d'eau qui sera un des intrants du digesteur et qui sera récoltée entière.

3.6. La jacinthe d'eau¹¹

La jacinthe d'eau est une plante invasive originaire d'Amérique du Sud qui envahit aujourd'hui les étendues d'eau douce des autres continents, notamment en Afrique sur le lac Nokoué, lieu où l'installation d'un digesteur pilote est envisagée. Dans cette partie, nous dresserons la fiche d'identité de cette plante. Nous établirons les conséquences néfastes qu'elle entraîne dans le milieu envahi ainsi que les solutions de valorisations potentielles. Parmi ces solutions, nous développerons tout particulièrement celle qui lie jacinthe d'eau et production de biogaz.

3.6.1. Feuille d'identité et conséquences environnementales

La jacinthe d'eau est une plante aquatique d'eau douce, flottante et invasive qui est souvent considérée comme *planta non grata*. Cette plante forme un tapis végétal dense rendant impossibles le transport par bateau et *a fortiori* la pêche. Selon les conditions du milieu, un tapis de jacinthes d'eau peut doubler de taille en 6 à 18 jours. Elle représente une réelle menace pour la biodiversité du milieu envahi. En effet, puisqu'elle occupe la surface de l'eau, elle :

- bloque les échanges entre l'atmosphère et l'eau et donc l'oxygénation de l'eau, mettant ainsi en péril la vie aquatique animale.
- empêche les rayons lumineux d'atteindre les plantes immergées, tuant ainsi ces végétaux et les animaux aquatiques qui s'en nourrissent.

¹¹ [Réf (20), (11)]

Des jacinthes d'eau en bonne santé peuvent peser jusqu'à 50 kg/m² (90% d'eau). Ceci représente une masse colossale de matière organique potentiellement méthanisable par un biodigesteur.



Figure 21: Envahissement de Ganvié par la jacinthe d'eau (octobre 2019)

Cette plante possède deux modes de reproductions. Quand les conditions de vie sont favorables, elle se reproduit par multiplication végétative. Lorsque la mauvaise saison arrive (haute salinité ou température basse par exemple), les fruits de la jacinthe d'eau tombent dans l'eau avec leurs graines. Pendant toute cette mauvaise saison, les graines restent en hibernation dans la vase. Quand la bonne saison revient, ces graines germent et donnent naissance à de nouvelles plantes.

3.6.2. Valorisation de la jacinthe d'eau¹²

Trois parties distinctes composent cette plante : les racines, les feuilles et la fleur. Son caractère invasif et sa prolifération rapide ont poussé les populations locales à trouver des activités de valorisation telles que :

- la fabrication de fils et de cordes (feuilles)
- l'élaboration de vannerie, de paniers et de nattes (feuilles)
- la mise au point de briquettes de charbon obtenues par la pyrolyse de la jacinthe d'eau (feuilles, fleur, racines)
- le traitement de l'eau ou phytoépuration (système racinaire mais besoin de la plante dans son ensemble voir Assainissement des eaux par la phytoépuration pg 70)
- la nutrition des animaux (feuilles)
- la production de biogaz (feuilles)

¹² Réf. (34)

- la création d'engrais ou le paillage des cultures (feuilles, fleur et racines)
- la production de fibres absorbantes pour faire face aux marées noires (racines)

3.6.3. La jacinthe d'eau dans le la Nokoué

Le climat du lac Nokoué induit une certaine périodicité dans la présence de la jacinthe d'eau sur le lac. La pluie et son impact sur la salinité de l'eau du lac est le facteur majeur qui influence sa (non)prolifération. Cette plante connaît sa plus grande expansion lors de la période d'eau douce, c'est-à-dire durant les périodes de fin juillet à octobre. Ensuite, la diminution de l'apport en eau pluviale réduit le débit des rivières qui alimentent le lac en eau douce. Le niveau du lac descend. Ce niveau se rapproche de celui de l'océan, l'eau du lac devient plus saumâtre. En conséquence, la jacinthe d'eau se développe à une vitesse plus lente dès décembre et finit par mourir vers mi-février lorsque la salinité devient trop élevée. Le seuil de salinité auquel le développement de la plante s'arrête est estimé à 15% de la salinité de l'eau de mer, soit $0,15 \times 35 \text{ g/kg d'eau} = 5,25 \text{ g/kg d'eau}$. Cette évolution de la salinité dans le lac à différents endroits est visible ci-dessous (voir Figure 22). En prenant l'année 2006 et la zone de Ganvié comme étalon, la jacinthe d'eau sera indisponible de mi-février à fin juin. Une alternative devra être trouvée pour alimenter le biodigesteur durant cette période.

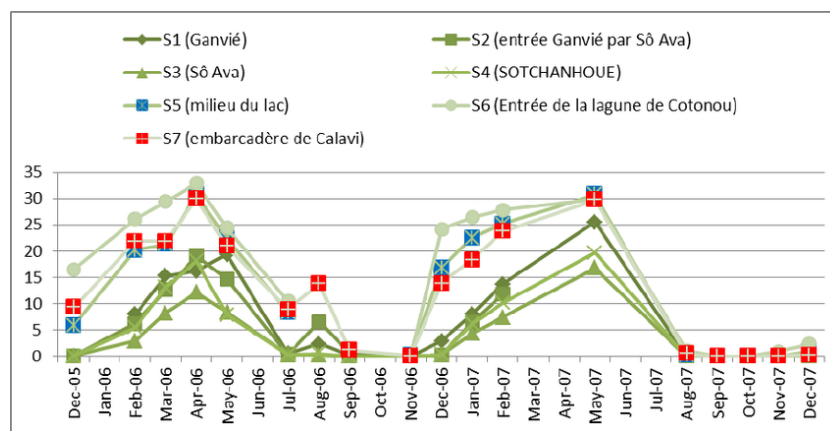


Figure 22: Evolution de la salinité du lac Nokoué à différents endroits en g/kg d'eau¹³

¹³ Réf. (37)

4. Installation du biodigesteur ARTI à Ganvié

Dans cette partie sont reprises les différentes phases du projet, de l'identification du lieu d'installation à l'installation elle-même en passant par les étapes de dimensionnement et de construction notamment.

4.1. Identification d'un lieu d'installation

L'objectif de ce projet étant l'installation d'une unité pilote en milieu lacustre, nous avons dû identifier un lieu qui puisse accueillir notre prototype et une équipe d'étudiants. Les maisons des Toffins ne sont pas très spacieuses, il aurait donc été difficile d'y ajouter un biodigesteur et une équipe de 5 étudiants. Notre choix s'est donc porté sur un hôtel, l'hôtel « chez M » à Ganvié (voir Figure 23). Les déchets produits par la cuisine de l'hôtel serviront pour l'expérimentation.

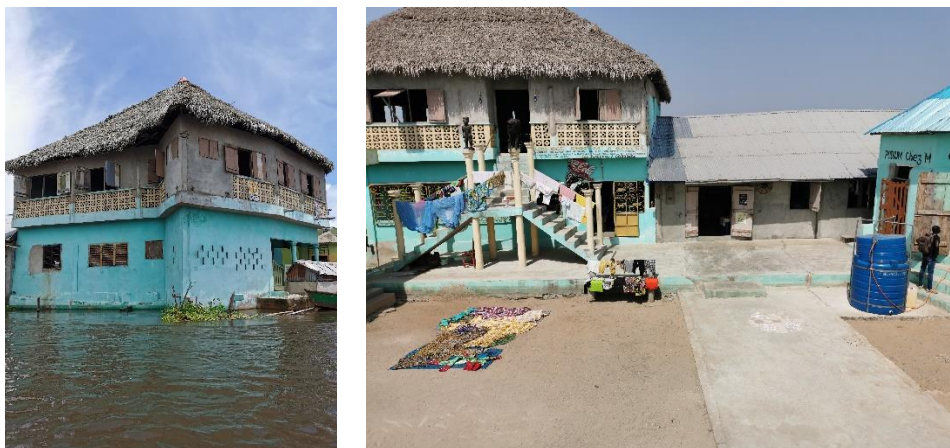


Figure 23: Hôtel chez M à Ganvié

4.2. Identification des intrants

4.2.1. Déchets de cuisine

Les déchets de cuisine étant pour l'instant directement rejeté dans le lac, il est essentiel de pouvoir les traiter et les valoriser *via* le biodigesteur. Ils se composent des restes de nourriture, généralement du riz, des bananes frites, des pâtes, des pommes de terre frites et quelques légumes. L'huile utilisée pour frire les aliments peut elle aussi être insérée dans le biodigesteurs.

4.2.1.1. Potentiel méthanogène¹⁴

Lors du stage, les appareils de mesures nous permettant d'expérimenter sur le pouvoir méthanogène (analyseur de gaz et débitmètre) des intrants n'ont été livrés qu'à la mi-décembre,

¹⁴ Réf. (42), (43)

soit une semaine avant la fin du stage. Il ne nous a donc pas été possible d'expérimenter sur la quantification et la qualification du biogaz produit à partir des déchets de cuisine de l'hôtel.

Nous baserons donc notre travail sur un doctorat et un document de l'Ademe (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Ces documents donnent des intervalles de volume de production de biogaz en fonction de différents intrants (voir Figure 24).

Pays	Origine	Potentiel	
		méthanogène (NLCH ₄ .kgMV ⁻²)	Référence
Chine	Restaurant universitaire	322	(Liu et al., 2013)
EEUU	Restaurants, hôtels et commerces	353	(El-Mashad & Zhang, 2010)
Suède	Ménager	395	(la Cour Jansen et al., 2004)
Chine	Restaurant universitaire	410	(Zhang et al., 2013)
EEUU	Restaurants, hôtels et commerces	440	(Zhang et al., 2007)
Royaume-Uni	Déchet de cuisine collecté à la source	501	(Tampio et al., 2014)
Irlande	Restaurant universitaire	528	(Browne et al., 2013)
Chine	Restaurant	540	(Wang & Zhao, 2009)
Chine	Cafeteria	540	(Dai et al., 2013)
France	Restaurant	571	(Peu et al., 2012)

Figure 24: Potentiel méthanogène de déchets de cuisine sans prétraitement et selon différents auteurs [Réf. (43)]

Le potentiel méthanogène varie donc de 0,322 à 0,571 Nm³ de CH₄/kg de matière volatile (partie de la matière sèche qui peut être biodigérée). Sachant que la matière volatile représente entre 72 et 97% de la matière sèche, nous prendrons comme hypothèse pour le dimensionnement du biodigesteur que 1kg de matière volatile produira 0,400 Nm³ de CH₄, que 1 kg de matière sèche est composée de 80% de matière volatile et donc que 1kg de matière sèche produira 0,8 x 0,400 Nm³ = 0,32 Nm³ de CH₄. Par ailleurs, le taux de matière sèche dans les déchets de cuisine est assez faible. Nous prendrons le taux de matière sèche moyen issu de document de l'ADEME, à savoir 15%.

4.2.2. La jacinthe d'eau¹⁵

La jacinthe d'eau étant composée de matière organique, il est possible de l'insérer dans un biodigesteur afin d'en récupérer le carbone sous forme de méthane et de dioxyde de carbone, c'est-à-dire sous forme de biogaz. Au vu de son apparition périodique, la jacinthe d'eau serait un intrant d'appoint si les déchets de cuisine venaient à manquer. Il est néanmoins intéressant de connaître son pouvoir méthanogène si des biodigesteurs fonctionnant uniquement avec de la jacinthe d'eau devaient être implantés.

¹⁵ Réf. (11), (35)

4.2.2.1. Potentiel méthanogène

Une étude basée sur la production de biogaz à partir de jacinthe d'eau en milieu mésophile (37°C) pendant 90 jours a permis d'obtenir du biogaz dont le pourcentage de méthane variait de 54 à 63%¹⁶. En moyenne, chaque kilo de matière sèche a permis de produire 630 litres de biogaz. Aucune incidence majeure sur le pH n'a été constatée, celui-ci restant stable avec des valeurs entre 6,5 et 8,5.

Dans une autre étude¹⁷, une production de 20,3 litres de biogaz a été mesurée par kilo de jacinthe d'eau et pour un temps de rétention de 54 jours (réacteur discontinu). La teneur en matière sèche moyenne de cette jacinthe d'eau a été mesurée et était de 3,57%. La production de biogaz par kilo de matière sèche est donc de près de 570 litres, ce qui est un résultat proche de l'étude précédemment citée. Des mesures de la production ont été faites tous les 3 jours (voir Figure 25). Le gaz est devenu combustible à partir du 12^{ème} jour. Pour cette expérimentation, le hachage de la jacinthe d'eau était relativement grossier (7 cm) et il n'y a pas eu de prétraitement (compostage). Afin d'augmenter la vitesse de la phase d'hydrolyse, un hachage plus fin et un temps de prétraitement peuvent être envisagés. Dans le cas du village de Ganvié, il n'y a pas de surface disponible pour effectuer un prétraitement, nous nous contenterons donc d'affiner au maximum le hachage.

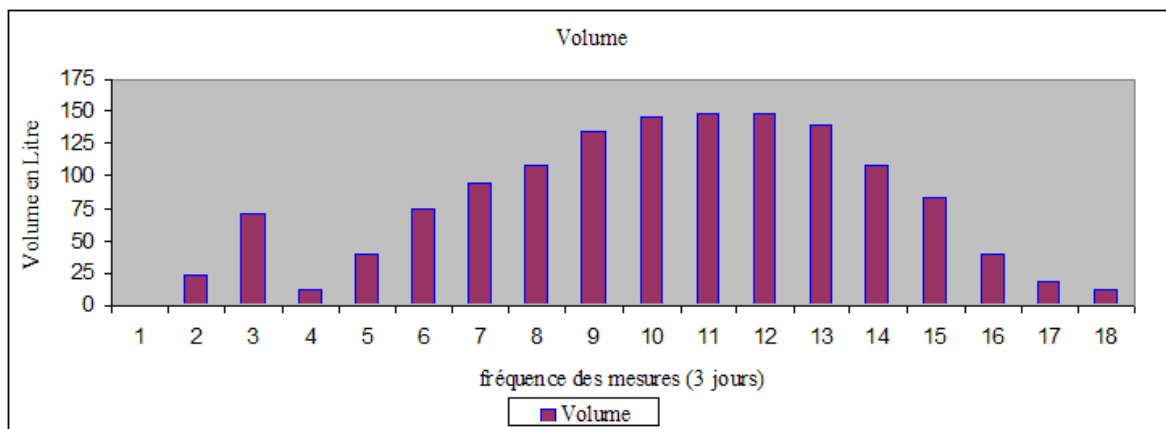


Figure 25: Volume de production du biogaz à partir de jacinthe d'eau hachées grossièrement sans prétraitement [Réf. (11)]

Lorsqu'il s'agira de dimensionner le biodigester, il faudra veiller à prendre en compte les mesures à partir du 12^{ème} jour puisque le biodigester sera déjà inoculé. La phase de

¹⁶ Réf. (36)

¹⁷ Réf. (35)

désoxygénation liée à ces 12 premiers jours sera en effet déjà effectuée. Ces données calculées pour 1 kg de matière sèche sont présentées à la Figure 26.

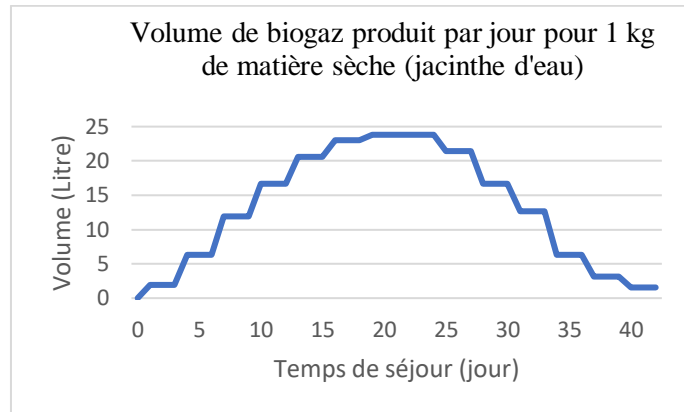


Figure 26: Volume de production journalier par kg de matière sèche (jacinthe d'eau) après inoculation

4.2.2.2. Digestat¹⁸

Le digestat obtenu lors de l'étude citée ci-dessus avait la composition suivante.

Paramètres	Unités	Jacinthe d'eau
Azote Kjeldahl	mg / kg/ MS/ N	627
Azote ammoniacal	mg / kg/ MS/ NH ₄ ⁺	128
Phosphore total	mg/kg /MS/ PO ₄ ³⁻	9930
Ortho phosphates	mg/kg MS/ PO ₄ ³⁻	690
Carbone organique total	mg/kg/ MS/ C	1099

Figure 27: Composition du digestat après biodigestion de la jacinthe d'eau durant 54 j [Réf. (12)]

Nous ne pouvons pas assurer que le digestat que nous obtiendrons sera aussi riche. En effet, ici, le but était d'atteindre la digestion totale de la jacinthe d'eau. Dans notre cas, nous essaierons de fournir une quantité de biogaz suffisante pour la cuisine d'une famille. Nous serons donc peut-être amenés à réduire le temps de séjour de la matière pour l'utiliser seulement dans sa période de productivité maximale (du 1^{er} au 28^{ème} jour). Dans ce cas, la décomposition de la matière organique serait incomplète et le digestat aura une autre composition. Une analyse ultérieure du digestat obtenu sera réalisée au second quadrimestre de l'année académique 2019-2020.

4.2.3. Déchets de toilettes

Les déchets humains des toilettes sont eux aussi rejetés directement dans le lac. Dans la suite du projet, il est envisagé de raccorder les toilettes de l'hôtel à un biodigesteur. Les clients seront amenés à utiliser ces toilettes. Le risque qu'il y ait des antibiotiques dans leurs selles est élevé

¹⁸ Réf. (12)

car la plupart des touristes qui se rendent au Bénin consomment des antipaludiques. D'autres antibiotiques tels que des antidiarrhéiques ou bien des résidus hormonaux issus notamment des pilules contraceptives peuvent aussi se retrouver dans le biodigesteur.

Il est donc conseillé de créer un biodigesteur à part qui recevra uniquement ce type de déchets afin de ne pas contaminer le digestat et nuire aux microorganismes. Une étude approfondie du digestat de ce biodigesteur devra être menée afin que sa dangerosité sanitaire soit confirmée ou infirmée.

4.3. Dimensionnement du biodigesteur

Les besoins journaliers en biogaz à Ganvié sont moins élevés que dans les villages terrestres. En effet, la difficulté d'approvisionnement en combustible rend les populations plus parcimonieuses vis-à-vis de l'utilisation des ressources énergétiques. Suite à une étude menée par les étudiants de l'UAC, le besoin moyen d'une famille a été établi à 0,5-0,6 Nm³ de biogaz pour la cuisine journalière. Les déchets de cuisine constitueront la base de l'alimentation du biodigesteur et seront donc introduits sur une base journalière. Lors de la période de prolifération de la jacinthe d'eau, celle-ci pourra être récoltée et introduite dans le biodigesteur si la production est insuffisante.

La biodigestion se fera par voie humide, un volume d'eau sera mélangé à un volume égal de déchets puis broyé afin d'éviter tout risque de colmatage et accélérer le processus de biodigestion. Un temps de séjour de 30 à 40 jours permet d'obtenir 50 à 60% du potentiel méthanogène des carbohydrates (plus lents à digérer à cause de la cellulose) et la majeure partie de celui des autres déchets (graisses et sucres simples)¹⁹. Un temps de rétention inférieur à 30 jours entraîne un risque de lessivage des bactéries. Un temps de rétention plus long aura comme conséquence de devoir utiliser un réacteur plus grand alors que la majeure partie du potentiel méthanogène aura déjà été extrait. Si la production de biogaz est insuffisante avec un temps de rétention de 40 jours, nous serons obligés d'envisager cette dernière solution.

La quantité de déchets de cuisine jetée quotidiennement est de 2 à 3 seaux de 10 litres. Cette quantité importante de déchets est due au fait qu'il n'y a pas de réfrigérateur dans les villages lacustres. Les mères cuisinent donc toujours trop afin que leur famille soit rassasiée et ce qui n'est pas mangé est jeté. La matière n'étant pas tassée dans les seaux, on peut estimer que 1 seau équivaut à 5 kg de matière. Les familles produisent donc 10 à 15 kg de déchets quotidiennement.

¹⁹ Réf. (43)

Au vu des hypothèses que nous avons formulées ci-dessus (4.2.1.1), nous avons donc à disposition entre 1,5 et 2,25 kg de matière sèche, ce qui nous assure une production de 0,48 à 0,72 Nm³ de CH₄ si toute la matière est digérée.

Envisageons le cas d'un temps de séjour de 40 jours. Au vu de la proportion importante de carbohydrates (près de 75% des déchets), nous pouvons poser l'hypothèse que seulement 60% du potentiel méthanogène sera récupéré après 40 jours soit entre 0,288 et 0,432 Nm³ de CH₄. La composition du biogaz produit sera aux alentours de 55% de CH₄, le reste étant majoritairement du CO₂. Le volume de biogaz récupéré quotidiennement sera donc de 0,52 Nm³ à 0,79Nm³. La production de biogaz sera donc suffisante pour alimenter un foyer.

Le volume inséré quotidiennement sera de 10 à 15 litres de déchets + 10 à 15 litres d'eau du lac lorsque celle-ci sera douce et de la pompe lors des mois de sécheresse. Le temps de séjour est de 40 jours donc le volume du biodigesteur devra être de 800 à 1200 litres. Le volume de la cuve retournée qui accueillera le biogaz doit quant à lui être de 600 à 1000 litres afin d'assurer le stockage quotidien du gaz.

4.4. Choix des cuves

Nous connaissons désormais les volumes des cuves à utiliser pour le biodigesteur. Deux cuves en polyéthylène haute densité utilisées comme réservoir d'eau constitueront le biodigesteur. Le polyéthylène a une bonne résistance chimique garantissant une bonne résistance structurelle dans le temps. Par ailleurs, il est recyclable et possède une résistance mécanique qui lui permet de contenir des volumes importants de liquide. Le



Figure 28: Cuves Supertank de 1,4 m³ et 1 m³

Le marché africain n'étant pas aussi bien fourni que le marché européen, le choix des cuves est assez restreint. La marque Supertank est celle qui fournit les meilleures cuves (étanchéité et qualité du moulage). La gamme de cuves se compose de volumes de 1 m³, 1,4 m³, 2 m³... Nous opterons donc pour les cuves de 1 m³ et 1,4 m³. Celles-ci se rapprochent en effet des dimensions calculées lors du dimensionnement. La cuve de 1,4 m³ accueillera la matière organique. Le temps de séjour sera donc un peu plus long et davantage de biogaz pourra être extrait de la matière organique insérée. Le biogaz sera stocké dans la cuve de 1 m³, ce qui nous assure un volume suffisant pour la production journalière de biogaz.

Ces cuves possèdent 3 orifices de 32 mm de diamètre, 2 sur la partie basse et 1 sur la partie haute de la cuve.

4.5. Choix des tuyaux PVC²⁰

Nous utilisons des tubes PVC pour l'alimentation du biodigesteur et l'évacuation du digestat. Dans cette partie, nous aborderons la différence entre tube PVC classique et « pression ». Nous étudierons aussi la résistance physique et chimique des tubes PVC. Suite à ces considérations, nous pourrions choisir les tuyaux adaptés au cas du biodigesteur ARTI.

4.5.1. Le PVC²¹

Le PVC ou polychlorure de vinyle est un plastique qui se compose de 47% en poids d'éthylène et de 53% en poids de chlore²². Son faible coût, sa légèreté, sa disponibilité et la bonne tenue de ses propriétés physiques et chimiques dans le temps en font un matériau de choix pour la construction des tuyaux d'alimentation et d'évacuation des biodigesteurs. A la fin de son utilisation, il peut être broyé et réutilisé pour produire d'autres objets en plastique. Les tuyaux en PVC sont couramment utilisés dans les circuits d'évacuation de l'eau de pluie ou des eaux usées. Il n'est pas fait pour être soumis à une pression constante.

4.5.2. Le PVC pression²³

Le PVC pression, PVC-C, CPVC ou PVC surchloré est un type de tube créé pour répondre aux besoins du secteur de la construction. Il présente une solidité accrue due à l'ajout de polychlorure de vinyle chlorure. Il est principalement utilisé dans les circuits d'alimentation en eau froide ou chaude, circuits où la pression est plus importante.

4.5.2.1. Classe des tubes

Vu les contraintes auxquelles les tubes PVC pression sont soumis, des normes ont été créées pour informer les utilisateurs des pressions maximales admissibles. La dénomination la plus utilisée est la classe PN.

La norme PN a été créée dans le cadre de la normalisation européenne. Ces 2 lettres sont suivies d'un nombre qui indique la pression maximale admissible en bar (ex : PN8) pour une utilisation où la température de la paroi du tube n'excède pas 20°C. Au-delà, un facteur de réduction doit être appliqué.

²⁰ Les références liées à ce chapitre sont les suivantes : Réf. (13),

²¹ Réf. (44)

²² Réf. (50)

²³ Réf. (45)

4.5.3. Impact de la température

En rapport avec le caractère thermoplastique des tubes en PVC, il y a une diminution de la pression maximale admissible si la température du tube augmente. Un facteur de réduction doit être appliqué lorsque la température est supérieure à 25°C, ce qui est le cas dans ce projet (voir Figure 29).

température de la paroi du tube [°C]		facteur de réduction
au dessus de	jusqu'à	
0	25	1,00
25	35	0,80
35	45	0,63

Figure 29: Facteur de réduction en fonction de la température [Réf. (13)]

4.5.4. Choix des diamètres

Les tuyaux PVC standards ont des diamètres extérieurs allant de 32 à 400mm. Un diamètre trop petit augmentera le risque de bouchage à l'alimentation. Un tuyau de diamètre élevé augmentera les coûts de production et le risque de fuite à la jonction tuyau-cuve. Nous opterons pour un tube de 90mm de diamètre pour la réalisation de l'alimentation de notre prototype. Le risque de fuite sera ainsi maintenu faible tout comme le risque de bouchage. Nous effectuerons cependant un suivi afin de valider ou non l'utilisation de ces tuyaux pour de futurs prototypes. Le conduit d'évacuation sera quant à lui fabriqué avec un tube de 50mm de diamètre. Le digestat ne faisant qu'y transiter, le risque de bouchage est nul et un tube de faible diamètre peut donc être utilisé.

4.5.5. Résistance chimique²⁴

Le PVC possède une excellente résistance à toutes les substances alimentaires. Il n'y aura donc pas de dégradation des tuyaux par le liquide organique qui y réside. Le PVC résiste aussi au H₂S (voir Figure 30), ce qui garantit le maintien de l'étanchéité structurelle de la cuve supérieure.

Description	Formule	Concentration	temp. °C	pvc	PE	PP
Acide sulhydrique, sec	H ₂ S	100%	60		+	+
Acide sulhydrique, aqueux		sat. à chaud	40	+	+	+
		sat. à chaud	60		+	+

Figure 30: Résistance de différents plastiques vis-à-vis du H₂S (+ = résistance au composant) [Réf. (13)]

²⁴ Réf. (13)

4.5.6. Choix des tuyaux

Le tuyau d'alimentation de 90 mm de diamètre devra résister à la pression de la matière insérée. Les tuyaux PVC simples ne sont pas construits pour supporter une pression constante. Par ailleurs, l'absence de contrôle qualité lors de l'importation des tuyaux rend aléatoires leurs caractéristiques. Nous choisirons donc un tuyau PVC pression normé.

Le seul tuyau PVC pression disponible étant un tuyau PN16, c'est celui-ci qui sera utilisé. Sa résistance de 16 bars, bien au-delà des contraintes auxquelles il sera soumis (1,5 m CE = 0,15 bar), nous assure le maintien de ses propriétés structurelles pour la durée de vie du biodigester.

Le tuyau de sortie ne sera pas soumis à une pression constante, du PVC simple sera choisi pour sa construction.

4.6. Construction du prototype

Des manuels de construction de digesteur ARTI peuvent être trouvés aisément sur Internet. En les consultant, nous pouvons constater que chaque biodigester a été construit avec des outils et des matériaux différents. Tout en nous inspirant de ces manuels, nous développerons notre propre méthode en lien avec les moyens techniques à notre disposition. Un manuel complet a donc été rédigé (voir Manuel de construction du biodigester ARTI pg.84) afin de pouvoir reproduire le prototype construit par l'UAC.

Le matériel commandé a été livré à l'UAC. Nous avons donc découpé les cuves et les tuyaux, assemblé les tuyaux avec leur coude et introduit les embouts et écrous aux différents orifices. Cependant nous n'avons pas fixé les tuyaux de sortie et d'alimentation à la grande cuve ni le circuit à gaz à la petite cuve pour faciliter leur acheminement à Ganvié (voir Figure 31).



Figure 31: Préparation des cuves et des tuyaux avant leur acheminement à Ganvié

4.7. Logistique et installation

Une fois les opérations citées ci-dessus terminées, le matériel a dû être transporté jusqu'à l'embarcadere de Ganvié puis jusqu'à l'hôtel « Chez M ». Le premier transport a été exécuté *via* un tricycle alors que le transfert jusqu'à Ganvié s'est fait par pirogue à moteur (voir Figure 32).



Figure 32: Chargement du tricycle (à gauche), arrivée du tricycle à l'embarcadere (milieu) et chargement de la pirogue (à droite)

Une fois le matériel déchargé à Ganvié, l'assemblage des tuyaux avec la cuve ainsi que la mise en place du circuit à gaz ont pu être faits. Ensuite, des tests d'étanchéité au liquide et au gaz ont été effectués. La cuve inférieure a été remplie au 2/3 avec l'eau du lac puis la cuve supérieure a été placée au-dessus, robinet de gaz fermé. Lorsque nous sommes revenus le lendemain, le niveau de la cuve supérieur et le niveau de l'eau n'avait pas bougé. Cependant, après une manipulation du tuyau d'alimentation, une fuite est apparue à la jonction entre l'écrou et la cuve (Figure 33). Nous avons alors procédé à la vidange de la cuve puis nous avons effectué un serrage à l'aide d'une clef faite sur mesure pour cet écrou. Après ceci, un second test d'étanchéité a été effectué et il s'est avéré satisfaisant.



Figure 33: Fuite de liquide entre la cuve et l'écrou du tuyau d'alimentation

4.8. Lancement de la production de biogaz

L'étanchéité au liquide et au gaz ayant été avérée, nous avons pu procéder à la phase de lancement. 180 kg de bouse ont été introduit dans le biodigesteur qui avait été rempli d'eau au 2/3 au préalable (voir Figure 34).



Figure 34: Homogénéisation du contenu du biodigesteur

Ensuite, cette bouse a été mélangée à l'eau pour obtenir une mixture homogène. La cuve supérieure a été placée par-dessus et descendue à son point le plus bas, robinet ouvert (voir Figure 35). Une fois ce point atteint, le robinet a été refermé afin que le peu d'oxygène qui y réside puisse être transformé par les bactéries.



Figure 35: Cuve supérieure placée à son point bas

4.9. Suivi de l'inoculation du biodigesteur

Tous les 2 à 3 jours, des mesures ont été effectuées afin de confirmer l'inoculation du biodigesteur. La semaine suivant le début de l'inoculation, 35 litres du digestat du biodigesteur

de l'UAC ainsi que 50 kg de bouse de vache ont été rajoutés afin d'accélérer l'inoculation. Le gaz a brûlé 10 jours après l'inoculation du biodigesteur. Le graphique suivant indique les concentrations des principaux gaz (O_2 , CO_2 et CH_4) lors de l'inoculation. Le second graphique décrit l'évolution du taux de H_2S lors de la même période.

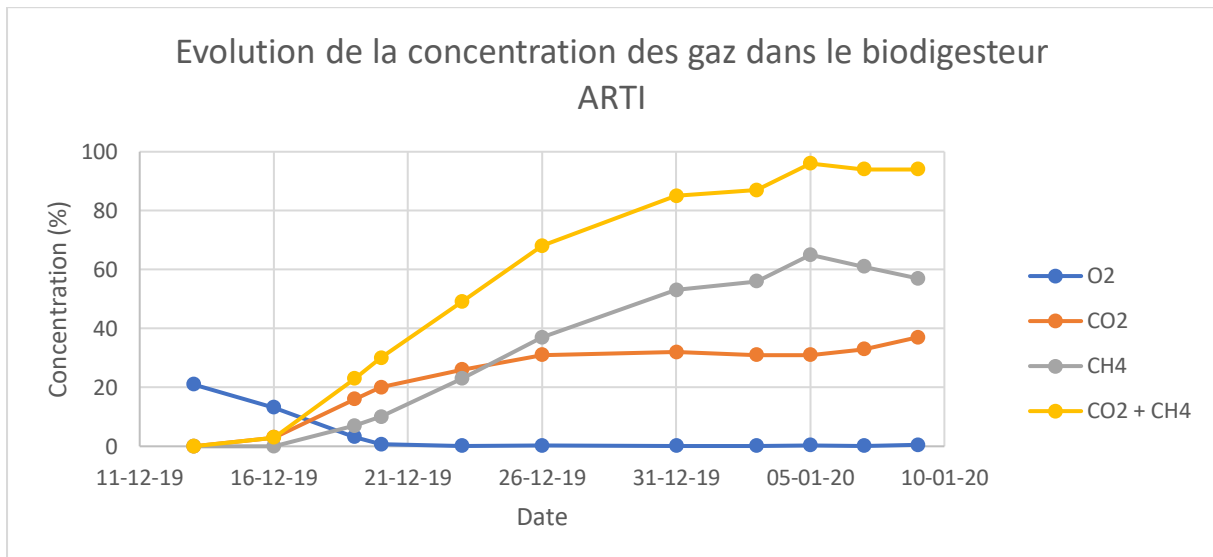


Figure 36: Evolution de la concentration des gaz dans le biodigesteur ARTI

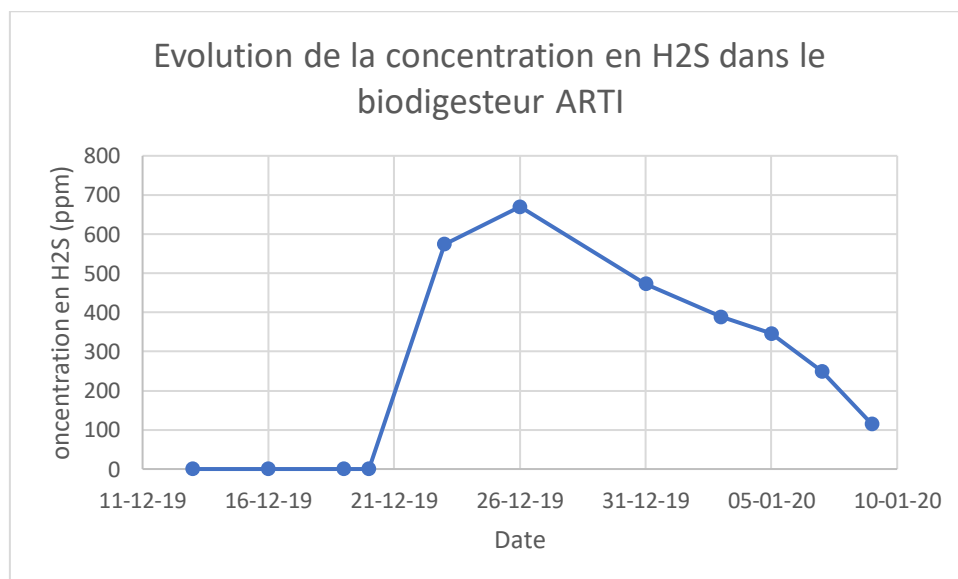


Figure 37: Evolution de la concentration en H_2S dans le biodigesteur ARTI

Comme le tableau précédent le montre, l' O_2 a presque complètement disparu en 1 semaine (0,7% d' O_2) ce qui atteste de l'étanchéité du biodigesteur. Le gaz a atteint 50% de concentration en CH_4 20 jours après le début de l'inoculation puis cette valeur s'est stabilisée pour osciller autour de 60%. Le taux de H_2S a quant à lui très fortement augmenté dès le 9^{ème} jour (574ppm) pour atteindre un maximum 3 jours plus tard à 670 ppm. Actuellement, aucun filtre n'a été mis

en place. Ceci se justifie par le fait que le H₂S est produit lors de la digestion de la bouse de vache et qu'après l'inoculation, ce sont des déchets de cuisine, pauvres en soufre, qui seront utilisés comme intrant. Ce saut d'H₂S n'est donc qu'un phénomène transitoire, ce qui est confirmé par les mesures : 115 ppm de H₂S mesurés 4 semaines après l'inoculation.

4.10. Pression du biogaz en fonction de la hauteur de la cuve supérieure

L'alimentation du brûleur à gaz doit s'effectuer peu importe la hauteur de la cuve et donc la pression du biogaz. Dans cette partie, nous nous intéresserons à la relation qui lie hauteur de la cuve supérieure et pression du biogaz. De cette relation, nous pourrions déterminer si oui ou non, la pression du biogaz fournie par le poids de la cuve est suffisante pour un fonctionnement optimal. Si ce n'est pas le cas, des masses seront ajoutées sur la cuve supérieure afin d'augmenter la pression du biogaz qu'elle contient.

La cuve supérieure est soumise à différentes forces. La première est la force poids qui est proportionnelle à sa masse (m) et à l'accélération de pesanteur ($g = 9,78 \text{ m/s}^2$ à l'équateur) et dirigée du haut vers le bas. La seconde est la force d'Archimède, dirigée du bas vers le haut, et proportionnelle au volume immergé de la cuve ($V_{\text{immergé}}$), à la masse volumique du liquide dans le digesteur ($\rho_{\text{liquide}} = 1100 \text{ kg/m}^3$) et à l'accélération de pesanteur (g). La force poids de la cuve sera constante alors que la force d'Archimède à laquelle elle est soumise variera en fonction de la hauteur de la cuve. Plus la cuve sera immergée et plus la force résultante et donc la pression s'appliquant sur le gaz qu'elle contient sera petite. Les formules mathématiques qui expriment ces forces sont donc les suivantes :

$$F_{\text{poids}} = m \cdot g$$

$$F_{\text{Archimède}} = V_{\text{immergé}} \cdot \rho_{\text{liquide}} \cdot g$$

$$F_{\text{résultante}} = P_{\text{biogaz}} \cdot S_{\text{cuve}} = F_{\text{poids}} - F_{\text{Archimède}}$$

Pour connaître la masse de la cuve, nous l'avons mesurée et avons effectué une expérience pour déterminer la masse volumique du plastique qui la compose, du polyéthylène haute densité (PEHD), qui a une masse volumique inférieure à celle de l'eau. Une chute de plastique d'épaisseur constante a été récupérée et découpée pour qu'elle ait la forme d'un rectangle. Ensuite, nous avons plongé ce morceau à la verticale dans de l'eau. Une fois à l'équilibre, la force poids et la force d'Archimède étaient égales. L'égalité suivante a donc lieu :

$$F_{\text{poids}} = F_{\text{Archimède}} \leftrightarrow m_{\text{plastique}} \cdot g = V_{\text{immergé}} \cdot \rho_{\text{liquide}} \cdot g$$

Le morceau de l'échantillon de plastique étant de largeur et d'épaisseur constante, le volume immergé et la masse de l'échantillon peuvent s'exprimer comme suit :

$$m_{\text{échantillon}} = V_{\text{échantillon}} \cdot \rho_{\text{plastique}} = (L \cdot l \cdot e)_{\text{échantillon}} \cdot \rho_{\text{plastique}}$$

$$V_{\text{immergé}} = (L \cdot l \cdot e)_{\text{immergé}}$$

Où L représente la longueur, l la largeur et e l'épaisseur. Dans le cas présenté, la largeur et l'épaisseur du morceau de l'échantillon de plastique et de sa partie immergée sont les mêmes. Nous pouvons donc simplifier ces termes dans l'égalité et nous obtenons la relation suivante :

$$L_{\text{échantillon}} \cdot \rho_{\text{plastique}} = L_{\text{immergé}} \cdot \rho_{\text{liquide}}$$

En isolant la masse volumique du plastique, nous obtenons donc la formule :

$$\rho_{\text{plastique}} = \rho_{\text{liquide}} \cdot \frac{L_{\text{immergé}}}{L_{\text{échantillon}}}$$

Le liquide étant de l'eau (masse volumique de 1000kg/m³) et les longueurs mesurées étant de 11,4 cm pour la longueur totale et 11 cm pour la longueur immergée, la masse volumique du plastique est donc de 964 kg/m³ aux erreurs de mesure près. En consultant les données disponibles sur Internet, on trouve que le PEHD a une masse volumique comprise entre 950 et 970 kg/m³²⁵. Pour nos calculs, nous prendrons la valeur de 964 kg/m³ pour la masse volumique du PEHD.

La cuve ayant un volume de plastique de 16,78 litres, elle a donc une masse de 16,17kg. La force poids est de 158,16N. La force d'Archimède dépendra quant à elle de la hauteur de la cuve immergée. La résultante de ces deux forces divisée par la surface du fond de la cuve nous donne la pression du gaz.

La pression minimale, lorsque la cuve est 2 cm au-dessus du niveau du liquide, est de 0,648 Pa. Une pression minimale de 20 Pa doit être assurée tout au long de l'utilisation du biodigester afin de vaincre les pertes de charge des tuyaux. Une masse doit donc être ajoutée pour augmenter cette pression de 20 Pa. Il faudra rajouter une masse telle que :

$$\frac{m_{\text{ajoutée}} \cdot g}{S_{\text{cuve}}} = 20 \text{ Pa}$$

²⁵ Réf. (46)

La section de la cuve étant de 0,95 m², la masse à ajouter sur la cuve est de 1,94 kg. Une masse de 2 kg sera donc suffisante pour garantir une pression minimale de 20 Pa.

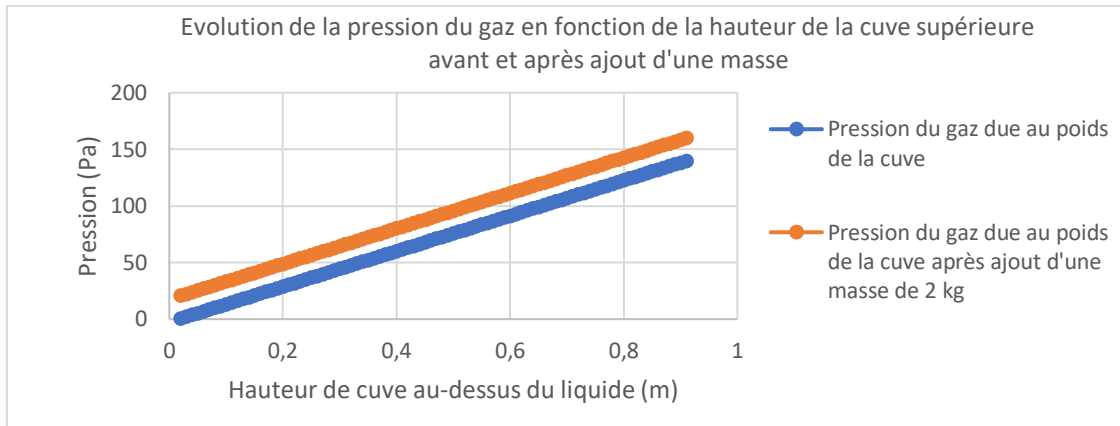


Figure 38: Evolution de la pression du gaz en fonction de la hauteur de la cuve supérieure

Pour l'instant, la pression varie donc lors de l'utilisation du biodigester. L'utilisateur doit gérer le débit du biogaz en fonction de cette pression par le biais du robinet. A l'avenir, un gicleur sera installé afin qu'un débit constant soit fourni à l'utilisateur peu importe la position de la cuve. Pour assurer le bon fonctionnement de ce gicleur, une pression minimale de 21 mbar²⁶ doit être assurée soit 2100 Pa. Cela équivaut à placer une masse de près de 200 kg sur le biodigester. La mise en place de ce système sera envisagée ultérieurement par une autre équipe d'étudiants.

²⁶ Réf. (57)

4.11. Prix du prototype et améliorations

Le coût de production total du biodigesteur s'élève à près de 300 000 Francs CFA (458€) (voir Figure 39).

Désignation	Prix unitaire	Quantité	Montant
Cuves			
Supertank 1400 L	100.000,00 CFA	1	100.000 CFA
Supertank 1000 L	85.000,00 CFA	1	85.000 CFA
Colle pour PVC	9.000,00 CFA	1	9.000 CFA
Sous-total			194.000 CFA
Bouche d'alimentation			
Embout 90	7.500,00 CFA	2	15.000 CFA
Ecrou tank 90	6.000,00 CFA	1	6.000 CFA
Coude PVC de 90	3.000,00 CFA	1	3.000 CFA
Tuyau de 90 PVC Interplast	23.000,00 CFA	1	23.000 CFA
Entonnoir	3.000,00 CFA	1	3.000 CFA
Sous-total			50.000 CFA
Sortie des résidus de digestion			
Embout 50	1.300,00 CFA	1	1.300 CFA
Ecrou Tank 50	3.500,00 CFA	1	3.500 CFA
Tuyau PVC de 50	2.200,00 CFA	1	2.200 CFA
Coude pvc de 50	2.000,00 CFA	1	2.000 CFA
Sous-total			9.000 CFA
Structure de maintien et bouchon petite cuve			
Bouchon tank 1000L pression 32	600,00 CFA	1	600 CFA
Embout Tank de 32	400,00 CFA	1	400 CFA
Ecrou Tank de 32	1.500,00 CFA	1	1.500 CFA
Joint d'étanchéité	1.000,00 CFA	2	2.000 CFA
Silicone	2.000,00 CFA	3	6.000 CFA
Teflon	400,00 CFA	6	2.400 CFA
Tuyau de 32 PVC	1.400,00 CFA	3	4.200 CFA
Coude de 32 PVC	300,00 CFA	4	1.200 CFA
Corde	100,00 CFA	12	1.200 CFA
Sous-total			19.500 CFA
Pour la sortie de gaz			
Écrou tank de 32 PVC	1.500,00 CFA	1	1.500 CFA
Embout de 32 pvc	400,00 CFA	1	400 CFA
Réducteur gaz 32/20 PVC	700,00 CFA	1	700 CFA
Mamelon laiton gaz	600,00 CFA	6	3.600 CFA
Manchon laiton gaz de 15/21	600,00 CFA	1	600 CFA
Vanne gaz 20	2.000,00 CFA	2	4.000 CFA
Tuyau gaz	500,00 CFA	6	3.000 CFA
Ceinture tuyau de 20	300,00 CFA	4	1.200 CFA
Sous-total			15.000 CFA
Transport	15.000,00 CFA	1	15.000 CFA
Sous-total			15.000 CFA
Total			302.500 CFA

Figure 39: Détail du prix du biodigesteur

Le coût peut être diminué en remplaçant certaines parties du biodigesteur par des pièces moins coûteuses. En effet, des tuyaux de diamètres plus petits peuvent être utilisés pour certaines parties du biodigesteur. Le tuyau de \varnothing 90 mm est difficile à trouver et son prix est 5 fois plus élevé que les tuyaux de \varnothing 75 mm et 110 mm. En appliquant ces améliorations, le tableau suivant montre l'économie escomptée :

Pièce de départ	Remplacée par	Economie
Tuyau de 90 mm	Tuyau de 75 mm	18 000 CFA
Coude de 90 mm	Coude de 75 mm	1800 CFA
Ecrou et embout de 90 mm	Ecrou et embout de 75 mm	7000 CFA
Tuyau de 50 mm	Tuyau de 32 (synergie avec le système de maintien)	800 CFA
Coude de 50 mm	Coude de 32 mm	1700 CFA
Ecrou et embout de 50	Ecrou et embout de 32 mm	2900 CFA
TOTAL		32 200 CFA

Figure 40: Amélioration du biodigesteur ARTI en vue de diminuer son coût de construction

Des économies supplémentaires pourront être faites si l'acheteur est un bon négociant ou si de grandes quantités de matériel sont achetées (construction de plusieurs biodigesteurs). Le prix total du biodigesteur sera alors de 270 300 Francs CFA (412€) soit une économie de 29 700 Francs CFA (46€).

4.12. Gain économique pour l'utilisateur

Le prix du biodigesteur correspond à la moitié du salaire annuel d'un Béninois moyen. Sur le long terme, ce prix sera rapidement amorti. En effet, chaque jour, une famille de Ganvié achète pour 300 CFA de bois pour la cuisine (donnée récoltée auprès des habitants). Sur une durée de 15 ans, soit la durée de vie du biodigesteur, cela représente un total de 1 643 625 CFA (2509€). Une famille moyenne économisera donc près de 2000€ sur la durée d'utilisation du biodigesteur ou 133€/an. Cette somme pourra être allouée à l'éducation des enfants, à l'amélioration des habitats, à une nutrition plus variée, à l'achat de panneaux photovoltaïques... à l'amélioration de leur condition de vie.

La capacité d'épargne des habitants étant inexistante, un système de location des biodigesteurs peut être mis en place afin que les habitants puissent s'offrir ce service.

4.13. Suite du projet

L'installation d'un biodigesteur pilote n'est que le début du projet. D'autres tâches doivent être effectuées :

- achat d'un débitmètre et d'un analyseur de pH,
- gestion du digestat produit,
- création d'un broyeur manuel,
- mise en place d'un piège à eau,
- étude de la production de biogaz due à la valorisation des déchets de cuisine,
- caractérisation du digestat produit,
- étude des débouchés pour ce digestat,
- mise en place d'une plateforme flottante pouvant accueillir le biodigesteur si les maisons des familles sont trop peu spacieuses ou si les pilotis sont trop fragiles,
- raccordement d'un biodigesteur aux toilettes de l'hôtel et caractérisation du digestat pour évaluer si oui ou non il peut être utilisé comme amendement ou bien s'il doit être épuré au préalable.

Un descriptif de ces tâches a d'ores et déjà été envoyé aux étudiants de l'UAC qui assureront le suivi du projet. Ce descriptif est disponible en Annexes (voir Tâches à réaliser à la suite du projet).

5. Travaux supplémentaires

Dans cette partie sont regroupés des travaux relatifs au fonctionnement d'un biodigesteur et à l'épuration des eaux. Par rapport au biodigesteur, il s'agit du choix d'un analyseur de gaz, de la filtration du gaz et de la valorisation du digestat ainsi que de son séchage. La fin du chapitre sera dédiée à l'étude d'un système de phytoépuration des eaux. Il est important d'étudier ce système dans le cas où le digestat d'un biodigesteur fonctionnant avec des déjections humaines s'avèrerait être impropre à une utilisation agricole.

5.1. Choix d'un analyseur de biogaz

Dans l'étude des biodigesteurs, il est important de mettre en relation la nature et la quantité des intrants avec la production de biogaz. En effet, sans connaître les concentrations des différents gaz composant le biogaz et le volume produit, il est impossible de faire un dimensionnement correct tant pour le volume du réacteur, du stockage ou encore du temps de rétention.

Afin de palier à ce problème, un document a été rédigé pour présenter les différents analyseurs de gaz disponibles sur le marché, leurs caractéristiques et le temps de livraison supposé avant leur arrivée à l'université d'Abomey-Calavi. Au regard de ce document, il a donc été possible d'effectuer un choix adapté en fonction des besoins d'analyse et des contraintes de prix. Une brève présentation de l'analyseur de gaz choisi, l'IRCD 4, conclut cette partie.

5.1.1. Comparaison des analyseurs de gaz et choix d'un appareil

Un comparatif avait déjà été effectué par un étudiant de HELMo Gramme. En repartant de son travail, le tableau suivant montre les données récoltées et synthétisées :

Société	Nom de l'appareil	Prix	Mesures effectuées
Gruter et Marchand (France)	GEMBIO	3000€	CH ₄ ,CO ₂ ,O ₂ ,H ₂ S
Gassensor (Chine)	GAS3200lbiogas	3000\$	CH ₄ ,CO ₂ ,O ₂ ,H ₂ S
Equipement Scientifique (France)	Biogas5000	4300€	CH ₄ ,CO ₂ ,O ₂

Figure 41: comparatif des prix des appareils d'analyse de gaz

Depuis ce comparatif, un nouvel appareil est produit par Gassensor : Le 3200plus. Après des recherches supplémentaires, l'appareil IRCD4 produit par Shiantech semble aussi convenir.

Au vu des travaux de l'équipe de doctorants et de Hugo Huchant, il est impératif que nous puissions mesurer la concentration en H₂S. L'appareil Biogas5000, qui ne permet pas cette mesure, est donc d'ores et déjà éliminé. Les datasheets des appareils ont été consultées ou demandées aux fabricants (voir Datasheets des analyseurs de gaz pg 99). Toutes les

informations non présentes dans ces données ont aussi été acquises auprès des fabricants, notamment pour le prix et le temps estimé de livraison. Les données récoltées sont présentées dans le tableau suivant (les cases noires signifient que la fonctionnalité n'est pas présente ou bien que le constructeur n'a pas pu nous donner cette information):

Critères	GEMBIO	3200L	3200 plus	IRCD 4
Prix	3250€ + 350€ (livraison) = 3600€	3000 \$	4200\$ + 75 \$ (livraison) = 4275 \$	1280\$ + 60\$ (pompe) + 50\$ (software) + 75\$ (livraison) = 1465\$
Poids	750 g	5 kg	1,2 kg	250g (sans la boîte de transport)
Dimension	110*225*52 mm	295*196*62 mm		130*66*30 mm
Autonomie	6h		7h	13h
Protection	IP 20			IP65
Gamme de mesure				
CO2	0 à 100%	0 à 50%	0 à 50%	0 à 100%
CH4	0 à 100%	0 à 100%	0 à 100%	0 à 100%
H2S	0 à 2000 ppm	0 à 9999ppm	0 à 9999ppm	0 à 1000ppm
O2	0 à 25%	0 à 25%	0 à 25%	0 à 30%
CO	0 à 300/4000/10000ppm (option combustion)		0 à 2000ppm	
H2			0 à 2000ppm	
Erreur absolue maximum sur la mesure				
CO2	0,3%	1%	1%	1%
CH4	0,2%	1%	1%	1%
H2S	5%	2%	3%	1ppm


O2	0,2%	2%	3%	0,1%
CO	5%		3%	
H2			3%	
Temps de mesure	+/-60s (par expérimentation)	< 10s	< 10s	< 70 s
T° de travail	5 à 45°C	0 à 50°C	-10 à 40°C	-25°C à 55°C
P d'entrée	0 à 30kPa	2kPa à 50 kPa	2kPa à 50 kPa	Atmosphérique
Stockage des données	OUI	OUI	OUI	OUI
Position GPS	NON	NON	OUI	NON
Canaux de communication	USB et Carte SD	RS-232 (ancien port) 	USB, Bluetooth 4.0, Application mobile	USB
Autres				Alarme en cas de dépassement d'une certaine valeur Programme d'analyse des données fourni

Figure 42: Tableau comparatif des analyseurs de biogaz

L'appareil le plus complet au niveau des mesures est le 3200 Plus, le plus précis est le Gambio et le moins cher est le IRCD4. Le 3200L est un matériel suranné en comparaison avec les autres. Il a une masse non négligeable de 5 kg, transmet les données *via* un port RS-232 et coûte 3000\$. Il peut donc être éliminé. Pour l'étude des biodigesteurs, nous ne souhaitons pas connaître le

taux de CO et de H₂. Le Gembio supplante donc le 3200 Plus au niveau du prix et de la précision. Pour départager le Gembio et le IRCD4, le prix et la résistance à l'eau et à la poussière (IP 65 pour l'IRCD4 contre IP20 pour le Gembio) ont été 2 facteurs prépondérants. La précision des appareils aurait pu aussi être prise en compte mais les 1% d'erreur du IRCD4 pour la mesure du CH₄ et du CO₂ sont acceptables. C'est donc finalement l'IRCD4 qui a été choisi.

5.1.2. Présentation de l'IRCD 4

L'appareil IRCD4 a été reçu le 9 décembre 2019, soit 2 semaines avant la fin du stage. Il n'a donc pas été possible d'effectuer d'expérimentations nécessitant une mesure précise des composants du biogaz. Ci-dessous, une image du contenu de la mallette de transport et de son contenu (voir Figure 43 et Figure 44) ainsi que sa description :

- 1) Pompe permettant l'aspiration du gaz si la pression interne du biodigesteur est insuffisante
- 2) Tuyau d'aspiration
- 3) Embout de la pompe
- 4) Analyseur de gaz IRCD4
- 5) Pièce reliant le tuyau d'aspiration aux 4 capteurs de l'analyseur
- 6) Prise de rechargement
- 7) Filtres de rechange
- 8) Câble USB pour le rechargement de l'appareil et le transfert des données
- 9) Filtre à eau et à poussière à fixer entre l'embout de la pompe et la pompe



Figure 43: Contenu de la mallette du IRCD4



Figure 44: Montage de l'IRCD4 et affichage post initialisation

A l'allumage, une initialisation de 60 secondes a lieu. Ensuite, la sonde de l'appareil peut être insérée dans le milieu dont le gaz doit être analysé.

5.2. Valorisation du digestat

Pour rappel, le digestat est un coproduit du biogaz qui sort du biodigesteur sous forme liquide et peut être utilisé comme amendement pour l'agriculture. Afin de faciliter son transport, un des travaux a consisté à dimensionner un séchoir solaire expérimental pouvant assécher ce digestat. Le second travail est une expérience agricole menée à l'UAC. Nous avons utilisé le digestat de notre biodigesteur comme engrais afin de déterminer si celui-ci augmentait la croissance des plantes.

5.2.1. Séchage solaire²⁷

Les ménages qui utilisent un biodigesteur ne se situent pas toujours à côté de terres cultivées. Le digestat produit par leur biodigesteur doit donc être transporté. Il contient cependant 90% d'eau. L'idée est de sécher ce digestat afin d'en faciliter le transport. L'utilisation du soleil comme source d'énergie pour le séchage évitera l'utilisation de ressources fossiles ou de bois. Son utilisation sera donc gratuite et non polluante mais soumise aux aléas de la météo. Dans

²⁷ Réf. (48)

cette partie, nous aborderons les principes du séchage solaire et procéderont au dimensionnement d'une installation en vue de créer un prototype.

5.2.1.1. Architecture générale

Le séchoir solaire se composera d'un capteur situé à proximité du sol. L'air ambiant entrera dans ce capteur et y chauffera. Ensuite, l'air chaud passera dans la chambre de séchage où se situera le digestat à sécher. L'air chaud et humide s'échappera par un conduit vertical situé sur le dessus de la chambre de séchage. La différence de température entre l'entrée et la sortie permettra le mouvement convectif de l'air de l'entrée vers la sortie sans avoir besoin de recourir à un ventilateur. Une porte et un tiroir seront ajoutés à la chambre de séchage afin de pouvoir y introduire le digestat. L'architecture du séchoir sera donc telle que présentée sur la figure ci-dessous (voir Figure 45).

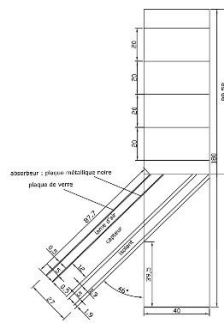


Figure 45: Architecture d'un séchoir solaire [Réf. (14)]

5.2.1.2. Dimensionnement du capteur²⁸

Ici seront présentées toutes les étapes du dimensionnement du capteur du séchoir solaire. Tout d'abord, nous fixerons les objectifs à atteindre par le séchoir. De là, il nous sera possible de déterminer le besoin en chaleur. Ensuite, sur base des données météorologiques, il nous sera possible de dimensionner un capteur qui fera corroborer l'énergie solaire captée et l'énergie utilisée pour sécher le digestat.

Pour notre séchoir expérimental, nous fixons que la masse de digestat à sécher est de 10 kg/jour. Le pourcentage de matière sèche initial est de 5 %. Nous souhaitons atteindre 80% de matière sèche afin de garantir la stabilité de l'engrais dans le temps. Nous pourrions trouver la masse d'eau à évaporer à partir de l'équation suivante.

²⁸ Référence de ce chapitre Réf. (50), (53)

$$m_{MS\text{ entrée}} = m_{MS\text{ sortie}} \Leftrightarrow m_{T\text{ entrée}} \cdot \%_{MS\text{ entrée}} = m_{T\text{ sortie}} \cdot \%_{MS\text{ sortie}}$$

Où $m_{MS\text{ entrée}}$ est la masse sèche insérée au début du processus, $m_{MS\text{ sortie}}$ la masse sèche en sortie du processus, $\%_{MS\text{ entrée}}$ le pourcentage de masse sèche à l'entrée, $m_{T\text{ entrée}}$ la masse totale à l'entrée, $m_{T\text{ sortie}}$ la masse totale à la sortie et $\%_{MS\text{ sortie}}$ le pourcentage de matière sèche à la sortie. La masse d'eau à évacuer sera donc égale à la masse totale à l'entrée retranchée de la masse de matière totale à la sortie.

Vu les données, la masse totale à la sortie sera donc de 0,625 kg/j. La masse d'eau à évacuer sera de 9,375 kg/j.

Pour évacuer cette eau, nous laisserons la matière sécher pendant 3 jours. Si nous considérons qu'une journée de séchage équivaut à 8 h (10h à 18h), cela signifie que la matière doit sécher en 24h soit une vitesse moyenne d'évaporation de l'eau de 0,3906 kg d'eau/h.

Afin de connaître la puissance solaire nécessaire au séchage, il nous faut quantifier la quantité d'eau qui peut être évacuée par l'air qui traverse le séchoir et donc sa température et sa teneur en eau à l'entrée et à la sortie. Grâce au préambule, nous savons déjà que la température annuelle moyenne est proche de 28°C. En ce qui concerne l'humidité relative de l'air, elle est en moyenne de 80% comme l'atteste le graphique suivant :

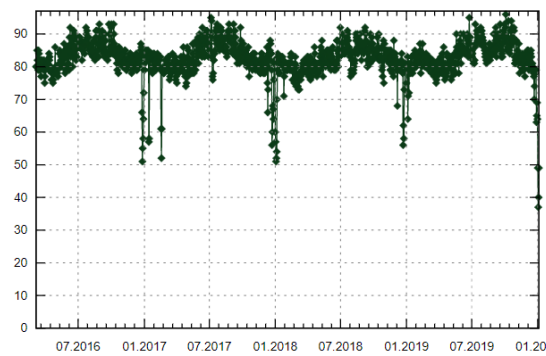


Figure 46: Mesure de l'humidité relative à Cotonou entre février 2016 et janvier 2020 [Réf. (15)]

Pour la suite du dimensionnement, nous aurons besoin du diagramme psychrométrique de l'air (voir Figure 47). Il nous permet, en connaissant l'humidité relative et la température de l'air, de déduire la quantité d'eau absolue que celui-ci contient ainsi que son enthalpie. Ces 2 données nous seront utiles pour la suite du dimensionnement.

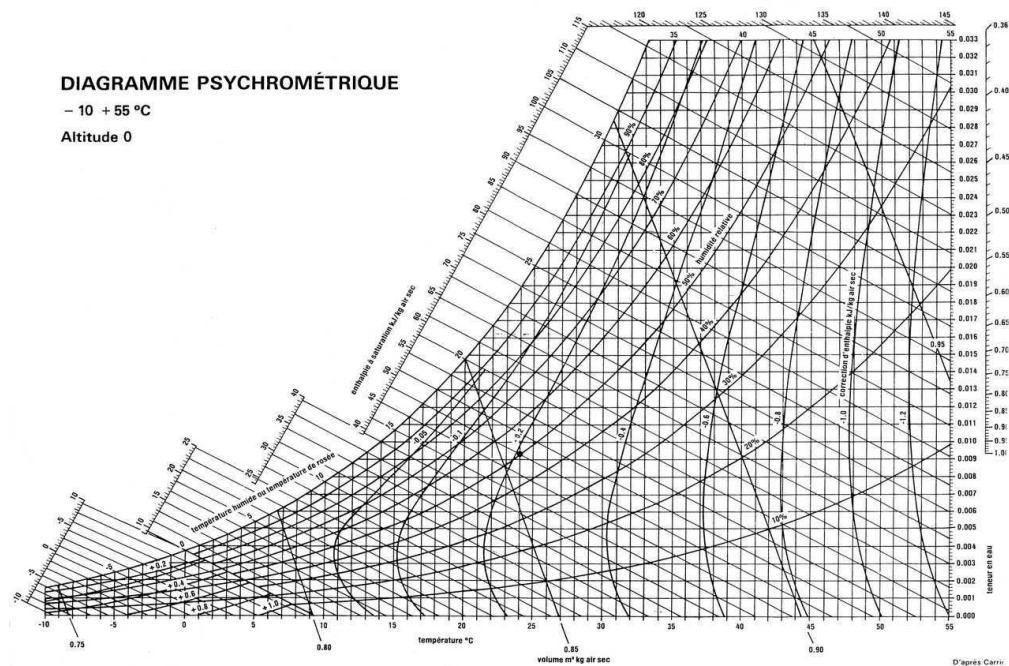


Figure 47: Diagramme psychrométrique de l'air [Réf. (16)]

Un air à 28°C qui contient 80% d'humidité relative équivaut à une quantité d'eau de 19,223 g/kg d'air²⁹. Dans la littérature, on trouve que la température atteinte par ce type de séchoir est de l'ordre de 50°C. L'humidité relative moyenne de cet air lors du séchage peut être fixée à 98%. Nous veillerons en effet à ce que l'air reste en contact le plus longtemps possible avec le digestat afin qu'il puisse se charger en eau. Arriver à saturer l'air en eau semble utopique, d'où le choix de cette valeur de 98%. Pour cette valeur de température et d'humidité, un kg d'air contient 84,749 g d'eau. 1 kg d'air permettra donc d'extraire 84,749 – 19,223 = 65,526 g d'eau. Sachant que la masse volumique de l'air est de 1,2 kg/m³ et connaissant vitesse moyenne d'évaporation de l'eau, nous pouvons calculer le flux d'air dans le séchoir qui sera de :

$$Flux\ d'air = \frac{v_{enlèvement\ eau}}{\rho_{air} \cdot m_{eau\ évaporée}}$$

Où le flux d'air s'exprime en m³/h, $v_{enlèvement\ eau}$ est la vitesse moyenne d'enlèvement de l'eau (kg d'eau par heure), ρ_{air} est la masse volumique de l'air (kg/m³) et $m_{eau\ évaporée}$ est la masse d'eau évaporée par 1 kg d'air (kg d'eau/kg d'air). Le flux d'air devra donc être de 4,968 m³/h. Afin de connaître la puissance nécessaire pour permettre un accroissement de température de ce débit d'air de 28 à 50°C et de son humidité de 80 à 98%, nous devons consulter le diagramme psychrométrique afin de déterminer la différence d'enthalpie entre ces 2 états. L'enthalpie de

²⁹ Réf. (52)

l'air en entrée sera de 77,212 kJ/kg d'air et son enthalpie à la sortie sera de 269,898 kJ/kg d'air. L'énergie totale à fournir par heure sera donc de :

$$(269,898 - 77,212) \times 4,968 \times 1,2 = 1148,673 \frac{kJ}{h} = 319,076 W$$

A cette puissance nécessaire doit s'appliquer le rendement du capteur qui exprime le rapport entre la puissance solaire disponible et la puissance transmise à l'air qui entre dans la chambre de séchage (les pertes entre l'entrée d'air et la chambre de séchage sont donc aussi prises en compte). Le rendement communément pris lors de ce genre de dimensionnement est de 50%³⁰. Nous aurons donc besoin de $319,076/0,5 = 638,152 W$.

Maintenant que la puissance nécessaire pour le séchage est connue, il nous faut étudier les données climatiques³¹ afin de déterminer la puissance solaire disponible. Le rayonnement solaire à la surface de la Terre est de maximum 1000W/m². Cette puissance est surtout dépendante de la couverture nuageuse et de la latitude du lieu étudié. En ce qui concerne Cotonou et ses environs, l'énergie solaire moyenne disponible par mois est la suivante :

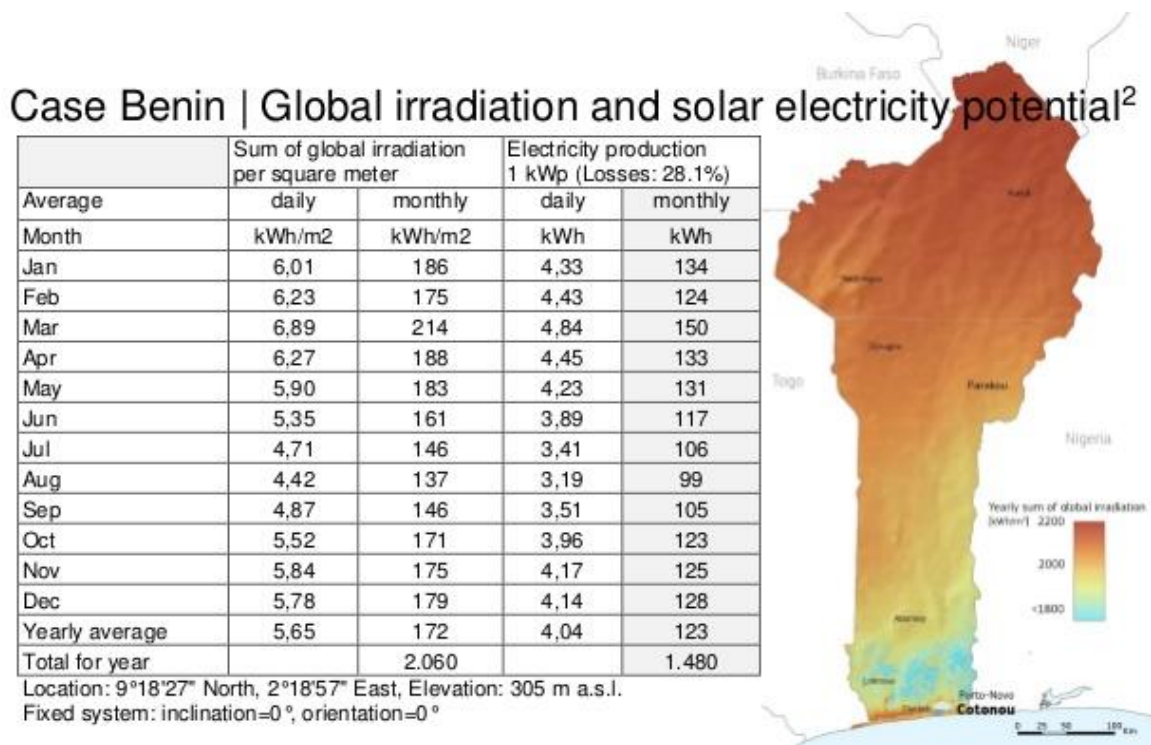


Figure 48: Irradiation et potentiel du photovoltaïque au Bénin [Réf. (17)]

³⁰ Réf. (52)

³¹ Réf. (55) et (54)

Il s'agit ici de l'irradiation globale. Concernant le séchoir solaire, c'est l'irradiation directe qui nous intéresse. La couverture nuageuse a donc toute son importance. Lors de la saison des pluies, celle-ci est importante et inexistante pendant la saison sèche. Vu l'importance des précipitations et de la couverture nuageuse lors de la saison des pluies, une alternative devra être étudiée pour cette période (séchage par brûlage du biogaz excédentaire par exemple). Nous envisagerons l'utilisation du séchoir du mois de novembre à mi-avril (saison sèche). Le mois d'août étant plus sec lui aussi, le séchoir pourra également être utilisé à cette période. L'énergie solaire minimale disponible par jour durant la période étudiée est de 5,78 kWh/m², en décembre. Pour capter cette énergie il est nécessaire de placer le capteur perpendiculairement aux rayons du soleil à chaque heure du jour. En effet, le rayonnement maximum capté par le capteur solaire sera de :

$$R_{\text{solaire disponible}} = R_{\text{solaire max}} \cdot \sin \alpha$$

Où $R_{\text{solaire disponible}}$ est le rayonnement solaire disponible à la latitude donnée (W/m²), $R_{\text{solaire max}}$ est le rayonnement solaire maximum à la surface de la Terre (1000 W/m²) et α est l'angle entre les rayons solaires et la normale au capteur.

Les moyens techniques disponibles ne permettant pas une installation rotative, nous opterons pour un capteur fixe. Nous l'inclinerons de telle manière à ce que l'angle entre les rayons du soleil et la normale du capteur soit inférieur à 65° durant les heures les plus chaudes. Cette valeur de 65° permettra de capter 90,6 % du rayonnement solaire ($\sin 65^\circ = 0,906$). Le capteur sera donc orienté plein sud avec un angle de 30°. Cette valeur de 30° permettra de capter de manière optimale les rayons du soleil lorsque celui-ci sera à son zénith en décembre (hauteur de 60° voir Figure 49). Durant les autres mois de l'année ou le capteur sera utilisé, l'angle entre la normale du capteur et le soleil à son zénith restera inférieur à 20° donc un rendement de 90% entre le rayonnement disponible et le rayonnement reçu sera maintenu.

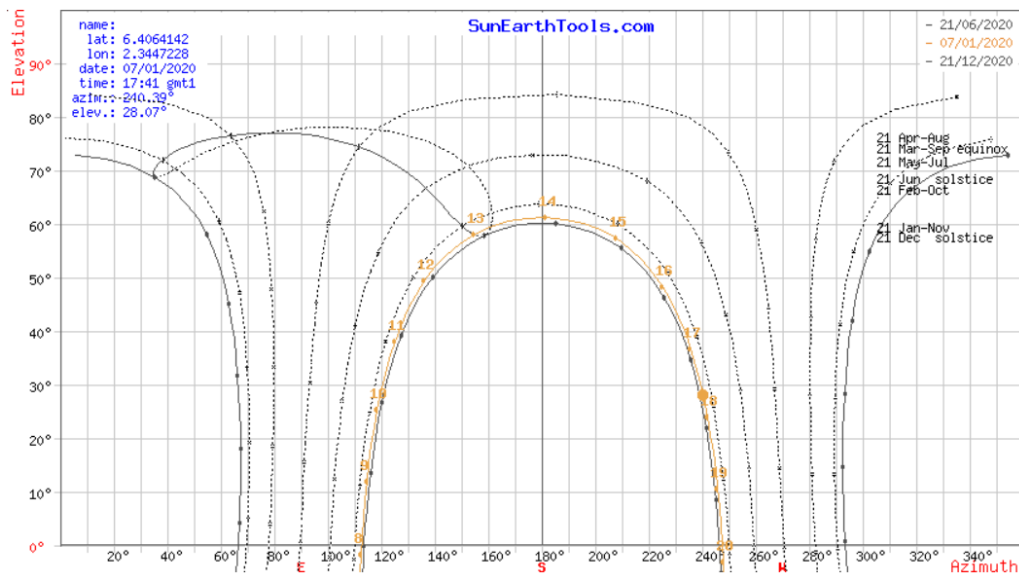


Figure 49: Course du soleil à Cotonou aux équinoxes et aux solstices [Réf. (17)]

Au regard du graphique ci-dessus (voir Figure 49), on comprend l'intérêt d'un séchoir solaire, même en hiver. En effet, la hauteur maximale du soleil y est tout de même de 60°. Comme point de comparaison, on notera que la hauteur du soleil au zénith durant le solstice d'été (21 juin) en Belgique est de 62°.

L'énergie disponible par jour en décembre est de 5,78 kWh/m². Vu l'orientation fixe du capteur, nous capturons 90% de l'énergie du soleil aux heures où son rayonnement est le plus fort (12h à 16h). En prenant en compte que le rayonnement avant 12 h et après 16 h sera moins bien capté, nous pouvons poser qu'entre 70 et 80% de l'énergie solaire disponible pourra être captée soit $0,7 \times 5,78 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j} = 4,046 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{j}$. Nous avons évalué nos besoins à 638,152 W pendant 8h/jour soit 5,105 kWh/j. La surface du capteur nécessaire pour assurer ce besoin en énergie sera de $5,105 / 4,046 = 1,26 \text{ m}^2$. 3 séchoirs devront être créés pour permettre la rotation des séchages. Une autre alternative est la création d'un séchoir 3 fois plus grand avec 3 tiroirs.

5.2.1.3. Création d'un prototype

Suite à ce dimensionnement, un modèle 3D inspiré de l'architecture présentée dans la première partie de ce chapitre a été réalisé sur Solidworks afin d'en faire une présentation. Malheureusement, ce modèle n'a pas été accepté car il n'est pas suffisamment automatisé. L'étudiant qui prendra la suite de projet bénéficiera toutefois du calcul de dimensionnement ci-dessus qui lui permettra de gagner un temps précieux.

5.2.2. Utilisation comme engrais

5.2.2.1. Mise en place d'une expérience pratique

Une caractérisation chimique et biologique du digestat devra être réalisée au second quadrimestre de l'année académique 2019-2020. Nous avons néanmoins déjà voulu mettre en place une expérience pratique pour mettre en avant l'influence du digestat sur des cultures. Voici comment le test s'est déroulé :

- création de 4 buttes de culture (voir Figure 50)



Figure 50: Création des 4 buttes de culture

- arrosage des buttes et paillage (voir Figure 51)



Figure 51: Paillage des buttes

- plantation de 4 plantes (piment, gombo, maïs et patates) chacune sur une butte de culture le 25/11/2019
- arrosage de la moitié de chaque butte avec du digestat
- arrosage de l'ensemble de la butte avec de l'eau de manière égale
- arrosage journalier d'eau
- arrosage hebdomadaire de digestat sur les demi-buttes tests
- Suivi de la croissance des plantes

5.2.2.2. Résultat

Le 16 décembre, soit après 3 semaines d'expériences, des différences manifestes apparaissaient déjà. Les plants de patates ayant reçu du digestat étaient bien plus développés que les autres (voir Figure 52).



Figure 52: Hauteur des plants de patates sans apport de digestat (à gauche) et avec apport de digestat (à droite)

Concernant les autres plantes, nous avons pu observer que :

- il n'y a pas de différence entre les plants de piments qui ont reçu du digestat et les autres. Ces plantes ayant une croissance beaucoup plus lente, des résultats seront visibles d'ici à la fin du mois de janvier.
- Les plants de maïs arrosés avec du digestat ont la même hauteur que les plants n'en ayant pas reçu. Cependant, les plants sans digestat ont leurs feuilles dévorées par les insectes alors que ce n'était pas le cas pour les autres. Il faut aussi noter que la forêt se trouve à quelques mètres des plants de maïs. Ceux n'ayant pas reçu de digestat sont les plus proches de cette forêt. Une hypothèse peut être que les insectes provenant de celle-ci s'attaquent d'abord aux plants les plus proches. Installer les plants de maïs avec digestat proches de la forêt lors de la prochaine expérience est un moyen de vérifier cette hypothèse.
- De légères différences de croissance semblent apparaître entre les différents plants de gombos. Quelques semaines supplémentaires seront nécessaires afin que cette différence puisse être avérée.

5.3. Design d'un filtre expérimental

Lors du travail de Hugo Huchant³², un filtre à H₂S a été mis en place. Il s'agit ici de dimensionner un nouveau filtre qui permettra de retirer le H₂S mais aussi le CO₂ et l'eau du biogaz.

5.3.1. Objectifs du filtre

Le filtre à biogaz capte les gaz autres que le méthane afin d'obtenir un produit plus pur en sortie. A terme, l'objectif est d'atteindre une concentration supérieure à 85% en méthane afin d'alimenter un générateur fonctionnant au gaz naturel. En effet, après avoir atteint l'autosuffisance en biogaz pour la cuisine, la production de biogaz pour alimenter un groupe électrogène est envisagée. Un tel groupe nécessite un débit de biogaz suffisant pour fonctionner. Un seul biodigesteur domestique ne suffira pas à atteindre ce débit (ou du moins pas assez longtemps). Mutualiser la production excédentaire et la centraliser peut être une solution pour assurer le fonctionnement du groupe électrogène. Les principaux gaz présents dans le biogaz sont le méthane (CH₄), le dioxyde de carbone (CO₂) et dans une moindre mesure, bien qu'il soit le plus dangereux pour le matériel et la santé de l'utilisateur, le sulfure d'hydrogène (H₂S), l'eau (H₂O) et des substances azotées (NH₂, NH₃). Nous ne prendrons pas en compte le filtrage des substances azotées car leurs concentrations et leurs effets seront négligeables. Le filtre se composera donc de 3 parties, une pour chaque composant à filtrer. Chaque partie devra avoir une durée de vie de 3 à 4 mois afin de limiter le nombre d'opérations à effectuer tout en gardant des dimensions raisonnables.

Le travail sur le filtre expérimental pour biogaz a débuté lors de la deuxième semaine de stage alors que nous n'avions pas encore d'analyseur de gaz. Nous repartirons donc des mesures obtenues lors du travail précédent pour dimensionner le filtre. L'alimentation du biodigesteur se faisant toujours avec le même type d'intrant, dans les mêmes conditions de températures et avec la même périodicité, on peut raisonnablement penser que la composition du biogaz n'a que peu changé. Dans le graphique de la Figure 53 se trouve le résultat des mesures concernant le CH₄ et le CO₂.

³² Réf. (1)

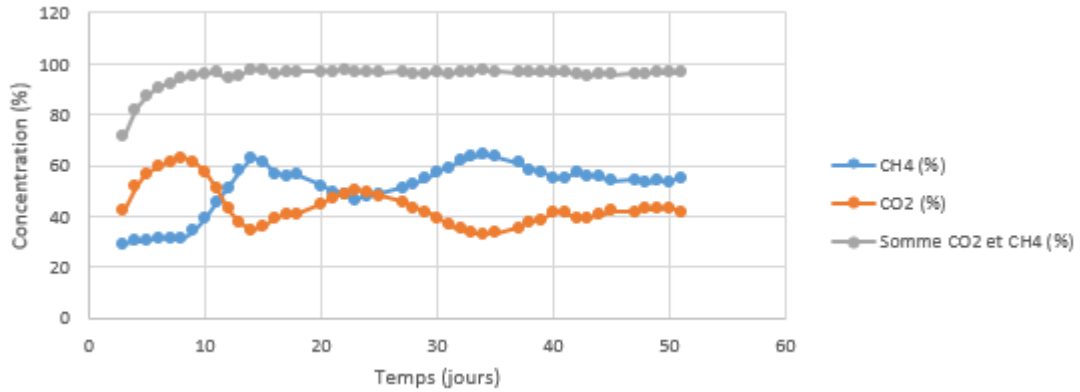


Figure 53: Evolution du pourcentage volumique des principaux gaz

Concernant le H_2S , des taux de 4000ppm ont été observés lors de l'inoculation du digesteur puis ce taux s'est stabilisé autour de 500 ppm. La teneur en H_2O n'a pas été mesurée mais elle est bien présente. En effet, le digesteur fonctionnant par voie humide, un équilibre gaz-vapeur se crée. La pression partielle de l'eau dans la partie gazeuse du digesteur dépendra de la température et de la pression du jour.

5.3.2. Design général

Un filtre (à H_2S) a déjà été étudié et créé par Hugo Huchant. Il est fait d'un tube en PVC rempli de matière filtrante (ici des oxydes de fer) et placé entre le biodigesteur et la poche de stockage (voir Figure 54). Sa mise en place simple et son faible coût le rendent donc facile à reproduire. Nous reprendrons donc ce design pour les filtres suivants.



Figure 54: Filtre à H_2S créé lors du travail précédent [Réf. (9)]

5.3.3. Filtre à H₂S

Pour rappel, le H₂S provient de la dégradation de la viande et de ses composants soufrés. C'est un gaz nocif sur différents aspects :

- il est corrosif et accélère donc l'usure des équipements métalliques utilisés tels les réchauds ou bien les générateurs électriques.
- Lors de sa combustion, il réagit avec l'O₂ pour former du dioxyde de soufre (SO₂) et, par la suite, de l'acide sulfurique (H₂SO₄) qui augmentera l'acidité des pluies.
- Il provoque aussi des problèmes au sein du biodigesteur car il est toxique pour les micro-organismes méthanogènes ([Réf. (15)]).
- Du point de vue de la santé, selon sa concentration et le temps d'exposition, il peut entraîner des désagréments qui vont de la simple irritation des voies respiratoires à la mort.

Du point de vue de la santé, la valeur limite d'exposition est de 14mg/Nm³ ou 10ppm ([Réf. (14)]). La valeur limite au sein du digesteur est quant à elle de 500ppm ([Réf. (15)]).

	Temps (min)	Concentration	
		mg/m ³	ppm
Seuils d'effets létaux	1	2 129	1 521
	10	963	688
	20	759	542
	30	661	472
	60	521	372
Seuils d'effets irréversibles	1	–	320
	10	–	150
	20	–	115
	30	–	100
	60	–	80

Figure 55: Seuils des effets létaux et irréversibles de l'hydrogène sulfuré

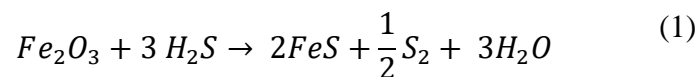
Paramètres	VME en mg/m ³	VLE mg/m ³
Sulfure d'hydrogène (H ₂ S)	7 (5 ppm)	14 (10 ppm)
Méthylmercaptan (CH ₃ -SH)	1	–

Figure 56: Valeurs moyennes d'exposition (VME) et valeurs Limites d'exposition (VLE) à contrôler

5.3.3.1. Principe de fonctionnement

Pour limiter la quantité de H₂S dans le biodigesteur, il faudra veiller à la qualité des intrants. Si les intrants végétaux ne posent pas de problèmes, les bouses et fientes d'animaux peuvent amener une quantité de soufre dont la quantité est liée à l'alimentation des animaux. De même, si le biodigesteur est alimenté par des déchets ménagers, les restes de viande devront être limités au maximum car eux aussi amènent plus de soufre *via* les protéines. Si la quantité de H₂S venait à être trop importante au sein même du biodigesteur, il existe une solution simple qui comporte néanmoins des inconvénients à savoir l'introduction directe d'oxydes de fer dans le biodigesteur. Ces oxydes vont être capables de fixer le soufre (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.****Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et de diminuer la concentration en H₂S. Ils vont aussi se retrouver dans le digestat et celui-ci ne pourra plus être utilisé comme amendement. Il faudra aussi penser à un système qui permet leur extraction par le bas du digestat car c'est là que se trouveront les oxydes.

Par rapport au soufre retrouvé en sortie de cuve, nous pouvons agir dessus en plaçant un filtre. Il existe plusieurs méthodes de filtration du H₂S. Celles-ci sont décrites dans le travail de Hugo HUCHANT³³. L'option qu'il a choisie est celle du filtre à oxyde de fer. Le principe est simple : de l'oxyde de fer, plus connu sous le nom de « rouille », est placé dans la canalisation qui relie la cuve au dispositif de stockage. La réaction suivante s'y produit :



En observant la limaille de fer après 4 mois de filtration, on remarque effectivement son jaunissement dû à la présence de soufre (voir Figure 57).

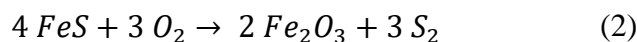
³³ [Réf. (9)]



Figure 57: Limaille de fer jaunie par le soufre

5.3.3.2. Régénération du filtre

Un avantage significatif de cette méthode est la possibilité de régénérer le filtre en exposant son contenu à l'air. Le désavantage est que la cinétique de réaction est extrêmement lente. Il nous faudrait chauffer le FeS à plusieurs centaines de degrés pour obtenir une vitesse de réaction acceptable (même technique que le grillage en métallurgie). La réaction de régénération est la suivante :



En régénérant le filtre, le soufre pur produit pourra être récupéré. Il serait possible d'en faire de l'acide sulfurique ou des engrais à base de sulfate. Cependant, les quantités sont tellement minimes et les installations nécessaires sont tellement onéreuses que cette valorisation ne sera pas envisagée dans le cas d'un biodigester domestique (voir Annexes pour l'estimation).

5.3.4. Filtre à CO₂³⁴

Le filtrage du CO₂ peut s'effectuer par le biais de différents procédés. Nous détaillerons ici seulement les techniques qui sont adaptées pour une installation de production de biogaz. Nous ne retiendrons ensuite que ceux qui sont adaptés à un biodigester domestique et réalisables avec nos moyens techniques et financiers.

5.3.4.1. L'absorption

L'absorption est une propriété présentée par les solides ou les liquides qui retiennent certains gaz ou liquides dans la totalité de leur volume. Grâce à cette propriété, il est possible de piéger le CO₂ dans certains liquides.

³⁴ Références de cette partie : [Réf. (22), (23), (27)]

5.3.4.1.1. Le lavage à l'eau

Le système de lavage à l'eau se décompose le plus souvent en 3 parties :

- Une tour de lavage où le gaz est injecté par le bas de la tour, à contre-courant de l'eau qui est diffusée depuis le haut de la tour
- Une tour de dégazage (flash tank) qui permet de récupérer une partie du méthane dissous et de le remettre dans le circuit de traitement
- Une tour de *stripping* où l'eau est régénérée (désorption du CO₂, du H₂S et du CH₄ résiduel)

Un système de séchage du biogaz filtré est placé en sortie du système afin d'éliminer l'eau.

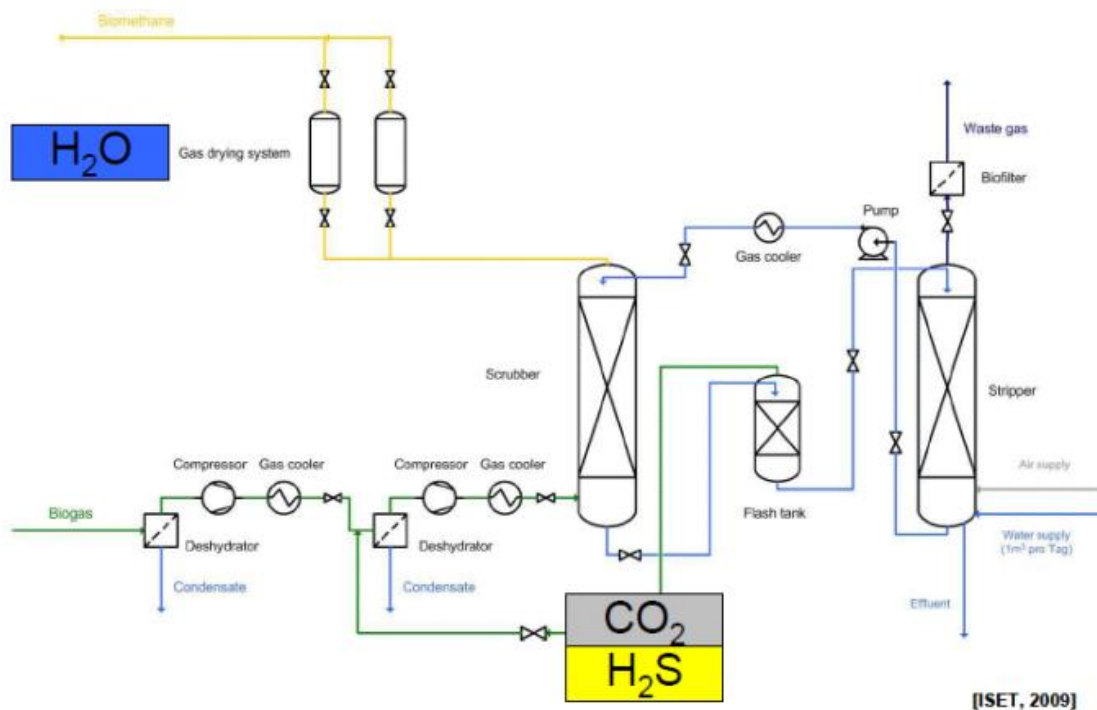


Figure 58: Schéma simplifié du processus de lavage à l'eau [Réf(21)]

Afin de garantir une bonne absorption du CO₂, il faut que ce lavage soit exécuté à très haute pression (min 50 bar). On comprend aisément que ce système soit destiné à être utilisé dans des installations qui ont une production élevée, ce qui n'est pas notre cas.

5.3.4.1.2. L'absorption physique

Cette méthode consiste à faire passer le flux gazeux dans un solvant liquide dans lequel les gaz à filtrer sont plus solubles que le gaz à récupérer. Le liquide le plus souvent utilisé est le glycol, liquide dans lequel la solubilité du CO₂ est élevée.

5.3.4.1.3. L'absorption chimique

L'absorption chimique consiste à faire passer le flux gazeux dans un solvant liquide avec lequel le gaz à filtrer réagit. Des absorbants chimiques solides peuvent aussi être envisagés. Une première phase est l'absorption du CO_2 par le solvant et la seconde consiste alors à régénérer le solvant en libérant le CO_2 capté (désabsorption à température élevée et pression basse). Il s'agit de la solution à privilégier pour les faibles teneurs en CO_2 .

L'hydroxyde de potassium (KOH) est le plus utilisé sur le marché pour la constitution de solvants liquides même si des amines sont aussi couramment utilisées. La chaux vive (CaO) est la plus utilisée dans le domaine des absorbeurs chimiques solides. Ce genre de filtre est simple à réaliser si la matière absorbante est disponible.

5.3.4.2. L'adsorption

L'adsorption est un phénomène se produisant entre des molécules de gaz ou de liquide, l'adsorbat, et la surface d'un solide, l'adsorbant. Si les conditions énergétiques et cinétiques permettent à la molécule de pénétrer au sein de la phase adsorbante, il y a adsorption. Le charbon actif est l'adsorbant le plus utilisé.

5.3.4.2.1. Pressure Swing Adsorption (PSA)

Le système se compose le plus souvent de 4 colonnes, une pour chaque gaz à filtrer (CO_2 , H_2S , eau et oxygène). Dans chaque colonne, la pression est fixée et un filtre membranaire constitué de métaux rares qui catalysent une réaction y est placé. La combinaison de ces 2 caractéristiques est telle que chacun des gaz est filtré dans une colonne dédiée.

5.3.4.3. La perméation ou séparation par membrane

La perméation ou séparation par membrane fonctionne comme un simple filtre se composant de fibres polymères.

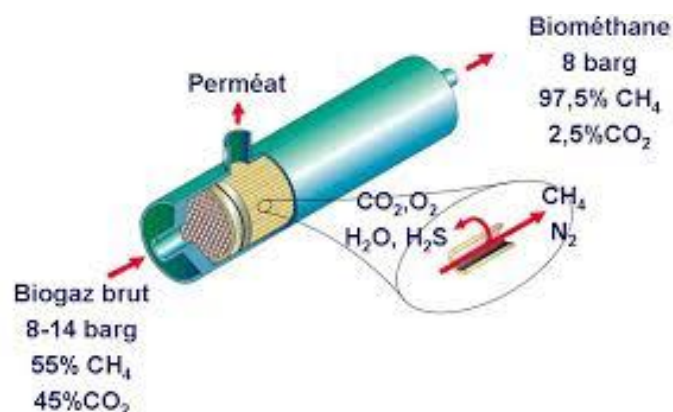


Figure 59: Filtre à biogaz

Cette technique est considérée comme celle possédant le meilleur rapport technico-économique. Néanmoins un compresseur est nécessaire pour vaincre les pertes de charge inhérente au filtre.

5.3.4.4. Choix de la méthode

De toutes les méthodes envisagées, celle qui convient le mieux à nos capacités économiques et techniques est la méthode par absorption par le CaO. Nous nous concentrerons donc sur cette méthode pour la filtration du CO₂. Une remarque importante est que cette méthode doit être uniquement utilisée à des fins expérimentales. En effet, le CaO doit être importé et il est produit dans des fours chauffés par des énergies fossiles. Son empreinte carbone est donc importante. Si du biométhane devait être produit, une installation de grande taille affublée d'un filtre membranaire serait la solution la plus viable. Un double stockage pourrait être envisagé afin de stocker le biogaz dans un premier temps puis d'utiliser un compresseur par intermittence pour filtrer le biogaz et stocker le biométhane dans un second contenant, une part de ce biométhane pouvant servir à alimenter ledit compresseur.

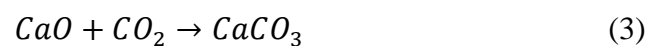
5.3.5. Design du filtre

Le CaO ou chaux vive vendu dans le commerce se présente comme une poudre blanche ayant une granulométrie de l'ordre du millimètre. Si nous plaçons cette matière dans un tube PVC, celle-ci risque de se tasser et de ne plus permettre au biogaz de circuler. Il nous faut donc trouver un moyen pour éviter ce tassement. Il est par exemple possible de récupérer des copeaux de bois et de les mélanger à la chaux vive ou bien de diluer la chaux dans de l'eau Elle devient alors de la chaux éteinte ou Ca(OH)₂. Ainsi, nous obtiendrons un mélange que le gaz peut traverser. Nous essaierons tout d'abord la méthode des copeaux de bois.

Il nous reste à établir la quantité de chaux vive à introduire dans le filtre. Nous partirons des hypothèses suivantes :

- la granulométrie fine de la chaux lui permet d'avoir une excellente réactivité. Nous estimerons que 100% de la chaux réagira.
- Une concentration de méthane de 85% est l'objectif à atteindre.
- La concentration en CO₂ de départ est assimilée à 50%. Cette concentration correspond au cas où la majorité de la matière digérée est de type végétal.
- La production journalière de biogaz est de 0,18 Nm³/j (production du biodigesteur expérimental de l'UAC).

- La pression à laquelle le gaz est soumis est de l'ordre de la pression atmosphérique soit 101 325 Pa.
- La température du biogaz est la température moyenne extérieure soit 27°C soit 300,15 K.
- Le biogaz est considéré comme un gaz parfait.
- La masse molaire du CaO est de 56g/mole.
- La masse volumique du CaO est de 3340kg/m³
- La réaction est complète. Cependant, sa cinétique est telle qu'il est raisonnable de dire que 75% du CaO réagira. La réaction est la suivante :



Nous souhaitons faire augmenter la concentration en CH₄ de 50 à 85%. La concentration en CO₂ doit donc diminuer de 50 à 15% soit une diminution de $\frac{50-15}{50} = 70\%$.

Sachant qu'il y a 50% de CO₂ dans le biogaz, que 70% de ce CO₂ doit être filtré et que notre production est de 0,18Nm³/j, nous devons filtrer $0,7 \times 0,5 \times 0,18 = 0,063 \text{ m}^3 \text{ de } CO_2/j$

Par la loi des gaz parfaits, ce volume journalier correspond à un nombre de mole journalier de $n_{CO_2} = \frac{p_{biogaz} \times V_{journalier}}{R \times T_{biogaz}} = 2,56 \text{ mol/j}$

Le rapport stœchiométrique étant de 1 mole de CaO pour une mole de CO₂, le nombre de moles journalières nécessaires de CaO pour la filtration sera de 2,56 mol/j.

Soit une masse de $m_{CaO_{journalier}} = 2,56 \times 56 = 143,33 \text{ g/j}$

Le filtre devant avoir une durée de vie de 3 à 4 mois, la masse de chaux à insérer sera, en kg, de $\frac{143,33}{1000} \times 30 \times (3 \text{ à } 4 \text{ mois}) = 12,90 \text{ à } 17,20 \text{ kg}$.

Cette masse correspond à un volume, en litres, de $\frac{(12,90 \text{ à } 17,20)}{3340} \times 1000 = 3,86 \text{ à } 5,15 \text{ l}$.

Nous prendrons un volume 10 fois plus grand afin de garantir la solubilité de la chaux dans le bain de filtration.

En réutilisant les tuyaux PVC de 75mm de diamètre, la longueur de tuyau nécessaire sera de $10 \times \frac{3,86 \text{ à } 5,15}{\left(\frac{75}{2 \times 100}\right)^2 \times \pi} = 2,19 \text{ à } 2,91 \text{ m}$.

Remarques :

- Si nous obtenons du méthane à un taux supérieur à 85% en sortie de filtre, la durée de vie de celui-ci devra être revue à la baisse.
- La cinétique de la réaction étant lente, il est possible que le taux de CO₂ ne baisse pas suffisamment. Dans ce cas, le filtre devra être allongé, un tuyau de PVC de diamètre inférieur devra être utilisé.

5.3.5.1. Régénération du filtre

Pour régénérer le filtre et donc récupérer le CaO, il faudra tout d'abord séparer le CaCO₃ du bois. Ensuite, la réaction de carbonatation du CaCO₃ est seulement possible pour des températures supérieures à 900°C. Elle se fait en général dans de grands fours à l'échelle industrielle. A notre échelle, il est difficile de procéder à la régénération de la chaux mais dans le cas de procédé industriel, il sera intéressant d'étudier cette opération.

5.3.6. Filtre à H₂O

Etant donné que la biométhanisation s'effectue dans une phase humide, un équilibre physique se crée entre la phase liquide et la phase gazeuse la surplombant. L'eau présente dans la phase liquide se retrouve dès lors aussi dans la phase gazeuse et donc dans le biogaz. De l'eau est aussi produite au niveau du filtre à H₂S lors de son élimination comme nous l'avons vu ci-dessus. Cette eau est problématique lors de la combustion du biogaz puisqu'elle diminue le pouvoir calorifique inférieur du biogaz (voir Lexique).

5.3.5.1. Le piège à eau : principe de fonctionnement

La mise en place d'un piège à eau est la solution la plus simple à mettre en place et la moins coûteuse. Le piège à eau consiste à faire passer le biogaz dans une conduite présentant une légère pente et située au point bas de l'installation. L'eau s'y condense et au bas de cette pente, on place un réceptacle qui récoltera les condensats.

L'efficacité du piège augmente d'autant que la différence de température entre celle du biogaz et celle de la conduite, plus froide, est grande. Nous envisageons donc de placer cette conduite sous terre et si possible, de maintenir cette terre humide. Lors de son évaporation, l'eau puisera son énergie dans la terre et la température y sera donc inférieure que dans l'air. En milieu lacustre, un piège à eau sous l'eau peut être envisagé.

5.3.5.2. Le piège à eau : mise en place

Une fois le point bas du réseau de gaz identifié, l'approvisionnement en gaz doit être interrompu. Ensuite, un té sera inséré au point bas de la conduite. Les 2 embouts horizontaux du té seront raccordés au circuit à gaz alors qu'un tuyau court sera inséré sur la partie verticale du té. Ce tuyau sera plongé dans un réceptacle rempli d'eau afin d'éviter toute fuite de gaz. L'étanchéité au gaz devra être vérifiée avant de rouvrir la vanne de gaz.

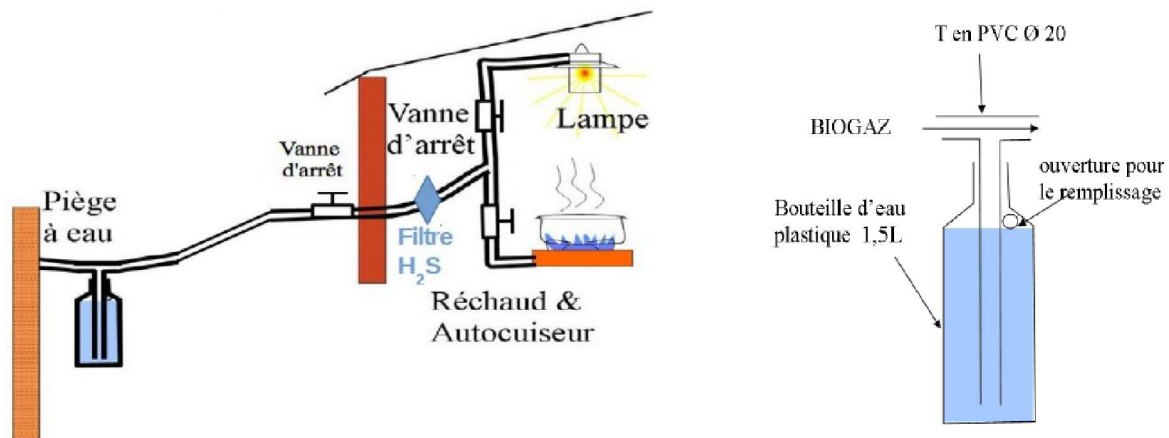


Figure 60: Architecture d'un piège à eau et intégration dans un réseau de biogaz [Réf. (16)]

5.3.7. Indicateurs pour le changement du filtre

Le filtre doit être changé lorsque la décomposition de la bouteille est telle que son étanchéité n'est plus garantie. Lors de son utilisation, le filtre doit être vérifié chaque semaine afin de maintenir un niveau d'eau suffisant pour éviter toute fuite de gaz.

5.4. Assainissement des eaux par la phytoépuration

5.4.1. Problématique

Actuellement, les villages lacustres tels Sô-Ava et Ganvié ne disposent pas d'un système de ramassage des ordures ni d'un système de récupération des effluents humains, aussi appelés « gisements ». Tous ces déchets sont donc jetés dans le lac. La mise en place d'un système d'épuration est donc primordiale pour l'assainissement des eaux du lac et l'amélioration de l'hygiène de vie des populations qui vivent dessus, soit près de 60 000 habitants.

Si la population accepte aisément l'idée de mettre ses déchets organiques dans le biodigesteur, il n'en est pas de même pour les effluents humains. En effet, culturellement parlant, la manipulation de ses propres déjections est inenvisageable. Si cette barrière culturelle venait à être passée, un autre argument contre l'utilisation des effluents humains serait la présence

potentielle d'antibiotiques qui mènerait à la destruction progressive de la faune microbienne du biodigesteur ou à la contamination du digestat.

En conclusion, la valorisation des déjections humaines peut être envisagée mais des analyses chimiques et biologiques précises des selles et du digestat produit doivent être réalisées. Dans le cas où la contamination serait avérée, une solution est de construire un biodigesteur seulement alloué à la transformation des déjections humaines en biogaz et de traiter le digestat. Une solution pour épurer ce digestat peut être la mise en place de bassin de phytoépuration.

5.4.2. Principe de fonctionnement³⁵

La phytoépuration, lagunage ou épuration par les plantes fait appel aux bactéries présentes dans les systèmes racinaires des plantes pour transformer les matières organiques en matières minérales assimilables par les plantes afin d'épurer l'eau. Par rapport à l'épuration classique, elle possède des avantages indéniables :

- Traitement des phosphates et des nitrates *via* des plantes qui se nourrissent de ces molécules
- Non-fermentation des effluents traités, annihilant ainsi les odeurs qui pourraient en émaner
- Durée de vie importante (une quarantaine d'années)
- Coût faible
- Entretien aisé par du personnel non qualifié (fauchage des plantes)
- Pas d'eau stagnante en surface donc impossibilité pour les moustiques de venir y pondre
- Production de matière végétale pouvant être valorisée (biodigesteur ou tressage par exemple)

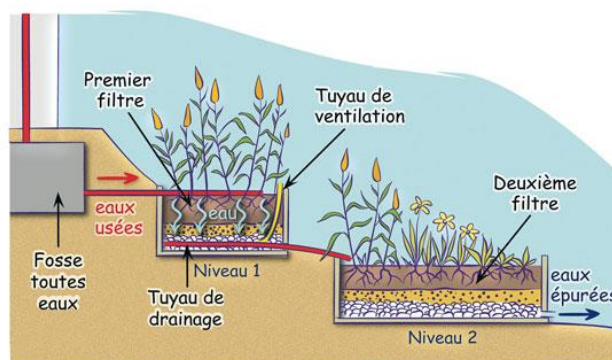


Figure 61: Principe de fonctionnement d'une station de phytoépuration à flux vertical multiniveaux [Réf. (17)]

³⁵ [Réf. (28), (29), (18)]

Il existe 2 grandes familles de phytoépuration : verticale et horizontale. L'épuration verticale consiste à amener l'eau à épurer par le haut du bassin et sur toute sa surface. Les dépôts grossiers restent en surface et se minéralisent. L'eau passe ensuite par les différentes couches du bassin où elle est épurée par les bactéries aérobies (les couches sont rendues perméables grâce aux racines des végétaux). Elle est finalement drainée par un tuyau percé situé dans le bas du bassin. Ce système nécessite l'utilisation de 2 cuves en alternance (1 par semaine) afin de permettre la minéralisation de la couche de dépôt et sa reperméabilisation. Du point de vue des performances du système, plus de 90% de la DBO₅ peut être traitée par un système possédant 2 étages (voir Figure 61) et il est possible de traiter 75% de la DBO₅ avec un étage (Figure 62).

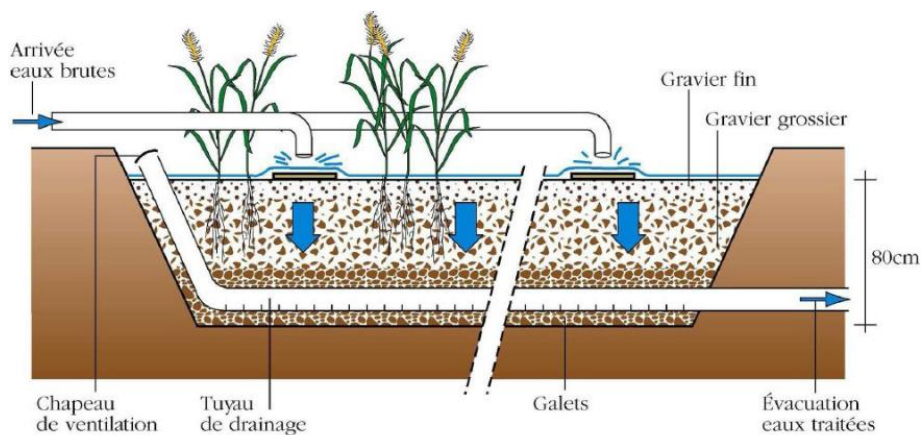


Figure 62: Architecture d'un bassin de phytoépuration à flux vertical à un niveau [Réf. (17)]

L'épuration horizontale consiste à introduire l'eau à épurer d'un côté du bassin et à récupérer cette eau de l'autre côté du bassin (Figure 63). Cette technique nécessite un moins grand dénivelé (la sortie se fait presque au même niveau que l'entrée). Cependant, son efficacité est moins grande et elle est le plus souvent utilisée comme second étage pour les épurations multi étages. Ce système ne requiert pas d'alternance.

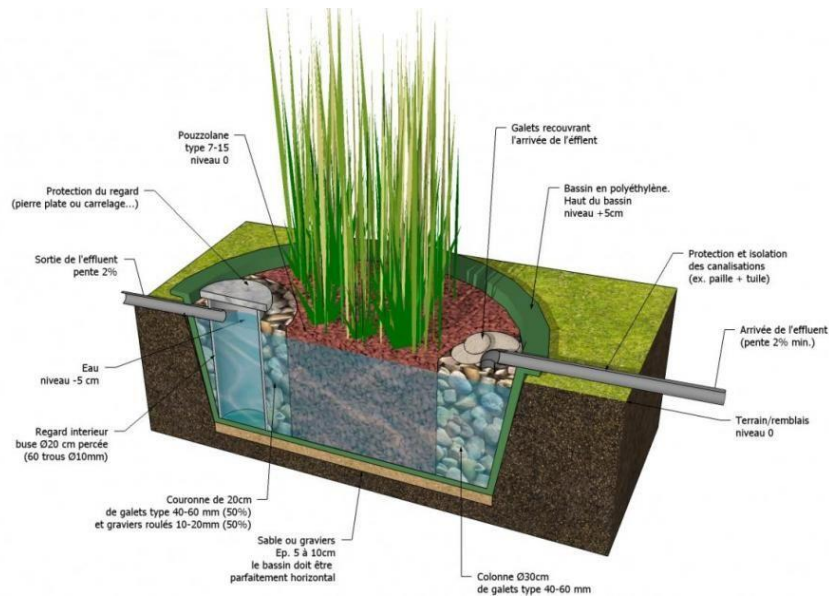


Figure 63: Architecture d'un bassin de phytoépuration à flux horizontal à un niveau [Réf. (18)]

5.4.3. Adaptation de la méthode au milieu lacustre

Comme illustré ci-dessus, les stations de phytoépuration sont le plus souvent constituées de bassins successifs, un dénivelé étant nécessaire pour permettre l'écoulement de l'eau purifiée du bas du premier bassin vers le haut du second. Les différents bassins de plantes sont la plupart du temps creusés et une bâche imperméable est disposée au fond afin d'éviter la pollution du sol. Dans le cas des villages lacustres, le fond de l'eau est horizontal et il est impossible de creuser des bassins. La phytoépuration à plat existe mais elle demande une pompe de relevage, à alimenter en électricité, en entrée ou en sortie du bassin d'épuration. Au vu de ces différentes contraintes, une possibilité est d'utiliser des bassins en polyéthylène dans lequel les plantes filtrantes et un lit de gravier seront installés. Certains bassins pourront être mis sur un support placé au fond de l'eau afin de créer une différence de niveau qui pourra permettre l'écoulement de l'eau par gravité.

5.4.4. Dimensionnement

5.4.4.1. Charge biologique et surface³⁶

En considérant qu'un habitant émet 60 g de DBO₅ /jour (voir Lexique), la surface à allouer par personne est de 2 m² avec 6 roseaux/m². En considérant que le nombre moyen de personnes par ménage est de 5 en milieu urbain et un peu supérieur à 6 en milieu rural, nous considérerons une surface d'épuration de 12 m². Dans un premier temps, le système ne serait composé que

³⁶ [Réf. (17), (2)]

d'un étage et nécessiterait donc 2 bassins pour effectuer une alternance. En utilisant des bassins ronds, une surface de 6m² équivaldrait à un diamètre de près de 2,8 m.

Un second étage pourrait être envisagé par la suite. Un bassin unique à flux horizontal vers lequel convergerait les sorties des 2 bassins à flux vertical semble être la solution la plus pratique. En effet, outre la nécessité de n'installer qu'un seul bassin, le dénivelé requis est moins élevé (entrée et sortie presque au même niveau) ce qui nous garantit une mise en place plus aisée au vu des conditions du milieu.

5.4.4.2. Matériaux et architecture du bassin

Le matériau envisagé est le polyéthylène. Ce thermoplastique chimiquement inerte, ayant une bonne résistance à l'oxydation et résistant aux variations de température se présente comme le candidat idéal pour la confection des bassins d'épuration. Au vu de la salinité du milieu, ces bassins devront être protégés. Il dispose en plus d'un prix abordable et est recyclable. La profondeur du bassin devrait être proche de 0,8m pour obtenir un optimum entre le volume traité et la qualité du traitement par le système racinaire des roseaux.

5.4.5. Entretien

La phytoépuration nécessite quelques opérations d'entretien ne nécessitant pas de connaissances techniques particulières et se faisant à l'aide de matériel rudimentaire. Ci-après un tableau explicatif qui reprend les opérations principales d'entretien :

Opération	Fréquence	Outils nécessaires
Désherbage : Un désherbage manuel doit être effectué de manière périodique afin de retirer les espèces non désirées.	2 à 4 fois par an (voire davantage) selon le taux de colonisation des plantes non désirées.	Bottes, gants
Faucardage : Le faucardage consiste à couper les tiges et feuilles fanées afin de favoriser la croissance des jeunes pousses.	1 à 2 fois par an quand les végétaux fanent	Faux, cisaille, gants, bottes
Retrait des dépôts humifiés : La couche filtrante prenant du volume,	Dès que la couche atteint les 10cm soit environ tous les 10	Pelle, râteau, gants, bottes

<p>une épaisseur de 8 à 10 cm doit être retirée. La surface doit d'abord être ratisée puis les boues doivent être retirées à la pelle.</p>	<p>ans. Cette opération doit être effectuée après le faucardage</p>	
--	--	--

Ces différentes opérations entraînent la récupération de matière organique. Les éléments récupérés lors du désherbage et du faucardage pourront servir à alimenter le biodigester. Les dépôts humifiés, ayant subi un compostage, ne possèdent plus un pouvoir méthanogène fort et pourront donc servir à des agriculteurs comme amendement.

6. Conclusion

La recherche d'un modèle de biodigesteur hors sol plus facile à utiliser que le modèle précédemment développé a mené à la création d'un biodigesteur de type ARTI. Les diverses données collectées sur les déchets ménagers et la jacinthe d'eau ont permis son dimensionnement. La construction de ce biodigesteur a pu être réalisée et un manuel de construction a été rédigé. Son installation s'est faite dans l'hôtel « chez M » situé à Ganvié. Le biodigesteur présenté a coûté un peu plus de 300 000 Francs CFA (458€) et a demandé un outillage simple, facile d'accès et peu onéreux.

L'inoculation de l'unité de production a été réalisée avec 180 kg de bouse puis une semaine plus tard de 50 kg de bouse de vache et de 35 litres de digestat issu d'un autre biodigesteur. L'inoculation touchant à sa fin, il sera maintenant question de valoriser les déchets ménagers et les jacinthes d'eau encore présentes sur le lac. La concentration en CH₄ dans le biodigesteur oscille autour de 60%, celle de CO₂ autour de 35% et le taux de H₂S est en diminution (115 ppm après un maximum à 670 ppm).

Ce travail a surtout permis l'amélioration de notre maîtrise du procédé de construction de biodigesteurs à cuve renversée. Il s'agit maintenant d'effectuer un suivi qui permettra de dégager des pistes d'amélioration en vue de créer d'autres biodigesteurs ARTI. Une fois qu'un modèle sera jugé excellent, il sera possible de lancer la création en série de ce type de biodigesteur.

Parallèlement, la caractérisation du digestat doit être effectuée. Ainsi, il sera possible de vérifier s'il est utilisable pour nourrir les élevages piscicoles ou bien s'il doit être utilisé comme amendement dans une exploitation agricole. En lien avec ceci, d'autres travaux ont permis de dimensionner un séchoir solaire. Ce dimensionnement peut servir pour créer un prototype qui servira à déshydrater ce digestat.

Lexique

DBO₅³⁷: la demande biochimique en oxygène pendant 5 jours, ou DBO₅, est une quantité témoignant de la qualité de l'eau. Elle correspond à la quantité de matière organique présente dans une eau. Elle est mesurée en milligramme d'oxygène nécessaire pendant 5 jours pour dégrader cette matière organique si elle était contenue dans 1 litre d'eau.

Nm³ ou Normaux mètres cubes³⁸ : dans les normes ISO, 1 Nm³ désigne 1 m³ de gaz lorsque la température de celui-ci est de 273,15 K et que sa pression est de 101 325 Pa ou 1 atm.

PCI ou Pouvoir Calorifique Inférieure³⁹ : cette expression désigne la quantité dégagée par la combustion d'une unité de masse de produit (1kg) dans les conditions standardisées. Plus le PCI est élevé, plus la quantité de chaleur produite lors de la combustion est importante. L'unité officielle est le joule par kilo mais il est en général exprimé en kilocalories/kilo ou en kilowattheure/kilo. Le mètre cube en conditions standards est souvent préféré au kilo lorsque l'on parle de gaz A titre indicatif, le PCI du méthane est de 9,94 kwh/Nm³. Celui du biogaz sera donc une fraction de cette valeur en fonction de son taux de méthane et si l'eau en a été retirée.

³⁷ Réf. (31)

³⁸ Réf. (40)

³⁹ Réf. (30)

Bibliographie

1. Bénin. *Team-monde*. [En ligne] [Citation : 01 Octobre 2019.] <http://www.team-monde.org/index.php?id=110>.
2. Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE) du Bénin. RGPH_Principaux indicateurs socio-démographiques et économiques. *Bénin Portail des données*. [En ligne] 10 Novembre 2016. [Citation : 07 Octobre 2019.] <http://benin.opendataforafrica.org/ohikebf/rgph-principaux-indicateurs-socio-d%C3%A9mographiques-et-%C3%A9conomiques?region=1000000-benin&lang=fr>.
3. Freedom in the World Map. *Freedom in the World*. [En ligne] [Citation : 04 Octobre 2019.] <https://freedomhouse.org/report/freedom-world/freedom-world-2019/map>.
4. Géographie du Bénin. *Présidence de la République du Bénin*. [En ligne] [Citation : 01 Octobre 2019.] <https://www.presidence.bj/home/le-benin/geographie/>.
5. Climat Sô-Ava. *Climate-Data*. [En ligne] [Citation : 01 Octobre 2019.] <https://fr.climate-data.org/afrique/benin/atlantique/so-ava-765616/>.
6. Cosmos Consulting. REPUBLIQUE DU BENIN DEPARTEMENT DE L ATLANTIQUE COMMUNE DE SO-AVA PLAN DE DEVELOPPEMENT COMMUNAL DE SO-AVA. *Doc player*. [En ligne] Avril 2015. [Citation : 01 Octobre 2019.] <https://docplayer.fr/68856633-Republique-du-benin-departement-de-l-atlantique-commune-de-so-ava-plan-de-developpement-communal-de-so-ava.html>.
7. L'énergie en Afrique : les faits et les chiffres. *Afrique Contemporaines*. [En ligne] Janvier 2017. [Citation : 04 Octobre 2019.] http://www.afrique-contemporaine.info/numero_revue/2017-1-l-energie-en-afrique-les-faits-et-les-chiffres/.
8. Naskeo. Description du processus biologique. *Naskeo Environnement*. [En ligne] [Citation : 08 Octobre 2019.] <http://naskeo.com/la-methanisation/description-processus-biologique/>.
9. Hugo, HUCHANT. *Contribution au développement d'une unité mobile de biométhanisation à usage domestique au Bénin*. Liège : s.n., 2019.
10. Dana, Ben. *Build Manual : ARTI floating dome biodigestor*. 2009.

11. Njogu, Pau, et al. *Biogas production using water Hyacinth (eicchornia crassipes) for electricity generation in Kenya*. Juja : s.n., 2015.
12. O., AlMoustapha et J., Millogo-Rasolodimby. *Production de biogaz et de compost à partir de eichhornia crassipes, (mart) solms-laub (pontederiaceae) pour un développement durable en Afrique sahélienne*. Ouagadougou : s.n., 2006.
13. Pipe for Life. *Catalogue 2014*. 2014.
14. SADOWSKI, A. G. *La problématique H2S : dispositions préventives et curatives*. Strasbourg : TSM, 2012.
15. P. Buffiere, M. Carrere, O. Lemaire, J. Vasquez. *Guide méthodologique pour l'exploitation d'unités de méthanisation de déchets solides. Environment LIFE Programme*. [En ligne] Juillet 2007. http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Methapi_Guide_Methodo_FR.pdf.
16. Centre Régional Songhaï. *Guide pratique du biogaz*. Porto-Novo : s.n., 2014.
17. Aquatiris. *Guide d'utilisation*. Quebriac : s.n., 2014.
18. Alp'Epur. Principe phyto-épuration. *Alp'Epur, ingénierie de l'eau*. [En ligne] [Citation : 08 Octobre 2019.] http://www.alpepur.fr/principe_vertical.php.
19. Fromm, Erich. *Le Coq-héron n°182*. Toulouse : Editions Eres, 2005. pp. 84-89.
20. (GOLD), Génération of leaders for development. Valorisation de la jacinthe d'eau pour la fabrication de biens et services en milieu lagunaire. *Objectif 2030*. [En ligne] 22 Avril 2017. [Citation : 01 Octobre 2019.] <https://www.objectif2030.org/projets/111/>.
21. Bénin : le contexte économique. *Expert-Comptable-Internationale*. [En ligne] [Citation : 01 Octobre 2019.]
22. A.LOPEZ, D. ROIZARD, E. FAVRE, A.DUFOUR. *Les procédés de capture du CO2 CAs des unités de traitement thermique des déchets*. Nancy : s.n., 2013. Etude N°11-0236/1A.
23. Ali, HOTEIT. *Etude expérimentale des mécanismes de capture du CO2 par cycle calcium en lit fluidisé circulant*. Alsace : s.n., 2006.

24. Banque Mondiale. Perspective monde. *Perspective*. [En ligne] [Citation : 04 Octobre 2019.] <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/BEN/fr/SP.URB.TOTL.IN.ZS.html>.
25. Gouvernement de la République du Bénin. Histoire. *Gouvernement de la république du Bénin*. [En ligne] [Citation : 04 Octobre 2019.] <https://www.gouv.bj/benin/histoire/>.
26. ONG Songhai. Qui sommes-nous ? Historique de Songhai. *Songhai*. [En ligne] [Citation : 04 octobre 2019.] <http://www.songhai.org/index.php/fr/qui-sommes-nous/historique>.
27. ADEME. *Principes et procédés d'épuration du biométhane pour l'injection dans les réseaux de gaz naturel*. 2011. Version 19/08/2011.
28. Mayo, Carine. L'épuration par les plantes, pensez-y ! *Terre vivante - L'écologie pratique*. [En ligne] [Citation : 2019 Octobre 2019.] <https://www.terrevivante.org/497-une-solution-alternative-la-phytoepuration.htm>.
29. Bailleux, Jean Dit. Phytoépuration : le procédé naturel pour le filtrage de vos eaux usées. *Paysagistes.pro*. [En ligne] 22 Août 2017. [Citation : 2019 Octobre 2019.] <https://www.paysagistes.pro/magazine/phytoepuration-procede-naturel-filtrage-de-vos-eaux-usees/>.
30. Portail de l'environnement. Pouvoir calorifique inférieure (PCI) La définition du dico. *Dictionnaire Environnement*. [En ligne] [Citation : 07 Octobre 2019.] https://www.dictionnaire-environnement.com/pouvoir_calorifique_inferieur_pci_ID123.html.
31. Futura Science. DBO5. *Futura-Sciences*. [En ligne] [Citation : 07 Octobre 2019.] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-dbo5-6374/>.
32. Tout sur le béton. La densité du béton et de ses constituants. *Tout sur le béton*. [En ligne] 17 Mai 2019. [Citation : 08 Octobre 2019.] <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/densite-du-beton-et-de-ses-constituants/>.
33. Eau Jardin. *Fiche technique des Galets*.
34. Calvert, Paul. *Water Hyacinth : Control and possible uses*. 1998.

35. T, Kunatsa et A, Mufundirwa. *Biogas Production from water hyacinth case of Lake Chivero - Zimbabwe A review*. 2013. 2277-3878.
36. Dirar, H.A. et El Amin, H.B. *Biogas Production from Water Hyacinth*. s.l. : Elsevier Applied Science Publishers , 1986.
37. BOWEN, James Douglas. *Caractérisation d'un système lagunaire en zone tropicale : cas du lac Nokoué*. Cotonou : s.n., 2011.
38. Index Mundi. Bénin Taux d'alphabétisation. *Index Mundi*. [En ligne] 11 Mars 2017. [Citation : 22 Octobre 2019.] https://www.indexmundi.com/fr/benin/taux_d_alphabetisation.html.
39. Gouvernement de la République du Bénin. Modernisation de la gestion des déchets solides ménagers dans le grand nokoué. *Gouvernement de la République du Bénin*. [En ligne] 09 Février 2019. [Citation : 22 Octobre 2019.] https://www.gouv.bj/actualite/213/modernisation-de-la-gestion-des-dechets-solides-menagers-dans-le-grand-nokoue/?fbclid=IwAR1kPD1aoH0Ncu54qq7Txn0FZYtrEs52T0FW_SH07XhO2G5WwnBxdveMhGo.
40. Mecaflux. Normaux mètres cubes(Nm3) et mètres cubes (m3). *Mecaflux*. [En ligne] [Citation : 23 Octobre 2019.] <https://www.mecaflux.com/Normaux%20metres%20cubes.htm>.
41. Hache, Emmanuel et Sokhna Seck, Gondia. Les énergies renouvelables, vecteur du décollage économique et social de l'Afrique ? *The Conversation*. [En ligne] 18 Décembre 2018. [Citation : 11 Novembre 2019.] <http://theconversation.com/les-energies-renouvelables-vecteur-du-decollage-economique-et-social-de-lafrique-107545>.

1. Estimation de la quantité de soufre récupérable lors de la régénération du filtre à H₂S

Afin de déterminer si la récupération de soufre vaut la peine d'être envisagée, nous allons ici essayer de quantifier la masse de soufre élémentaire récupérable. La quantité de H₂S présente dans le biogaz lors des tests effectués par Hugo Huchant variait autour de 500 ppm après l'inoculation du biodigesteur. Pendant l'inoculation, des quantités de 4000ppm ont été mesurées mais elles ne sont que le reflet d'une phase transitoire. Nous ne les prendrons donc pas en compte. En sortie du filtre, la concentration n'était plus que de 40 ppm.

Le volume de production n'ayant pas pu être mesuré lors de son travail, nous ferons l'approximation de la production sur base des données fournies dans le fascicule édité par le centre Songhai⁴⁰. Il est estimé que 10 kg de bouse humide produiront 0,36 Nm³ de biogaz. Le digesteur étudié ici a été dimensionné pour recevoir un approvisionnement de 10 kg par jour et la bouse est diluée dans un rapport de 1 volume d'eau pour 1 volume de bouse. Notre production moyenne devrait être de $0,36/2 = 0,18$ Nm³/jour. En pratique, nous utilisons une poche de stockage d'un mètre cube et, entre le lundi matin et le vendredi soir soit 5 jours, elle est gonflée presque totalement. Cette approximation de 0,18 Nm³/jour ne semble donc pas aberrante.

Connaissant les concentrations en soufre à l'entrée et à la sortie du filtre ainsi que le volume produit, nous pouvons désormais calculer la quantité de soufre théoriquement récupérable.

Quantité de soufre en 500 ppm

entrée

Quantité de soufre en 50 ppm

sortie

Quantité de soufre 450 ppm

récupérée par le filtre

Passage en g/m³

1 ppm = 10⁻⁶m³ de H₂S par Nm³ de biogaz

Par la loi des gaz parfaits (p.V = n.R.T) :

$$\frac{n}{V} = \frac{p}{R.T} = \frac{101325}{8,309.(273.15+27)} = 40,22 \text{ mole}/\text{m}^3 \quad (\text{éq. 4})$$

$$MM_{\text{H}_2\text{S}} = 32,065 + 2.1 = 34,065 \text{ g/mole}$$

⁴⁰ [Réf. (16)]

De là

$$\begin{aligned} 450ppm &= 450 \times 10^{-6} \times 40,22 \times 34,065 \\ &= 0,62 \text{ g/m}^3 \end{aligned}$$

Où : (éq. 5)

- n = le nombre de moles (mole)
- V = le volume étudié (m³)
- p = la pression du milieu (Pa)
- R = la constante des gaz parfaits pour les unités utilisées (Pa . m³. mole⁻¹. K⁻¹)
- T = la température du milieu (K)
- MM_{H₂S} = la masse molaire de H₂S (g/mole)

Masse journalière récupérable Pour une production de 0,18 Nm³ par jour, la masse de soufre récupérable sera donc de :

(éq. 6)

$$0,18 \times 0,62 = 0.116 \text{ g/jour}$$

En conclusion, la masse de soufre récupérable est tellement faible qu'elle ne sera pas envisagée dans le cas des biodigesteurs domestiques.

2. Manuel de construction du biodigesteur ARTI

Construction d'un biodigesteur ARTI en milieu lacustre



Auteur : MOISSE Martin, étudiant du Master de Génie Energétique Durable à Helmo Gramme, Belgique

Ce travail a été réalisé lors d'un stage de fin de Master à l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin, en collaboration avec les étudiants et le corps professoral de la FAST et supervisé par le Professeur Kounouhewa

1. Introduction

Le biodigesteur ARTI est un biodigesteur de surface développé par l'école du même nom (Appropriate Rural Technology Institute), située en Inde. Il est utilisé pour valoriser les déchets de cuisine des ménages et les transformer en biogaz utilisable pour la cuisine. Son architecture est relativement simple. Deux cuves de tailles proches sont utilisées. Elles seront dépourvues de leur partie haute. La plus grande des cuves accueillera la matière organique et la plus petite sera retournée dans celle-ci pour stocker le biogaz. La grande cuve est pourvue d'un tuyau d'entrée pour la matière et d'un tuyau de sortie pour le digestat alors que la plus petite sera équipée d'une sortie à gaz pouvant être ouverte *via* un robinet ou une vanne. Un système de guidage sera ajouté afin d'éviter le basculement de la petite cuve lorsqu'elle sera en position haute.

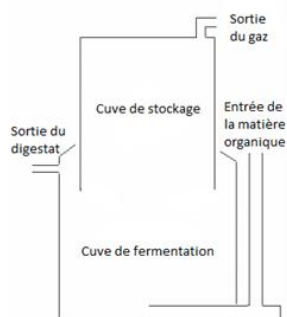



Figure 64: Architecture du biodigesteur ARTI

2. Liste du matériel

Le matériel cité ci-dessous est le matériel qui a été utilisé dans ce projet. La taille des cuves et des tuyaux disponibles dépend fortement du pays dans lequel le projet prend place. La longueur des tuyaux donnée est la longueur nécessaire pour construire un biodigesteur. Cependant, ces tuyaux se vendent le plus souvent à l'unité (4 ou 6m).

2.1. Matériaux

Cuves : Cuves à eau Supertank de 1400 et 1000 litres	
--	--

<p>Tuyaux PVC : \varnothing 90 mm pression (2 m), \varnothing 32 mm (12 m), \varnothing 50 mm (2m)</p>	
<p>Raccords : 1 coude de \varnothing 90 mm, 1 coude de \varnothing 50 mm, 4 coudes de \varnothing 32 mm, un réducteur \varnothing32→20 mm</p>	
<p>Embouts et écrous : 1 couple embout-écrou de \varnothing 90 mm, 1 écrou de \varnothing90 mm, 1 couple embout-écrou de \varnothing 50 mm, 2 couples embout-écrou de \varnothing 32 mm, 1 couple embout-écrou avec bouchon de \varnothing 32 mm (fourni avec les cuves)</p>	
<p>Bouchon : un bouchon de \varnothing 32 mm</p>	
<p>Circuit à gaz : Tuyau à gaz (6m), 1 robinet en laiton, 1 vanne en laiton, 6 tétons en laiton, 1 brûleur à gaz</p>	
<p>Autre : Entonnoir avec un diamètre de sortie inférieur à 90 mm, corde plate (12 m)</p>	

2.2. Outils et autres

- 1 outil de découpe : scie sauteuse, scie, scie à métaux...
- 1 mètre
- 1 corde
- 1 marqueur indélébile
- 1 lime/papier de verre
- 6 rouleaux de téflon
- Silicone et pistolet à silicone
- 1 clef à molette
- 1 grande clef à molette (serrage de l'écrou de \varnothing 90 mm)
- 1 colle pour PVC

3. Au préalable

Avant d'acheter les cuves, il faut s'assurer que les conditions suivantes soient remplies :

- Présenter une qualité suffisante que pour garantir l'étanchéité
- Avoir une différence de diamètre de +/- 10 cm afin d'assurer le glissement de la petite cuve dans la grande, d'éviter toute gêne qui pourrait être provoquée par l'écrou haut du système d'évacuation et de réduire la surface du liquide en contact avec l'air
- Choisir une cuve de stockage et une cuve pour le biodigesteur qui aient des volumes suffisants que pour répondre aux besoins du ménage
- **Tous les assemblages vissés doivent se faire avec du Teflon**
- Les instructions d'utilisations de la colle PVC doivent être respectées à la lettre afin d'assurer une bonne étanchéité et une bonne tenue des collages dans le temps

4. Préparation des cuves

Cette première étape de la fabrication consiste à découper les couvercles des cuves afin de permettre le glissement de la petite cuve dans la grande cuve.

4.1. Matériel

- 1 Cuve Supertank de 1400L
- 1 Cuve Supertank de 1000L

4.2. Outils

- Scie

- Corde
- Marqueur

4.3. Mode opératoire

- 1) Mesurer le diamètre de la petite cuve avec la corde
- 2) Reporter ce diamètre sur le couvercle de la grande cuve et tracer le cercle avec un marqueur



- 3) Enlever le couvercle de la petite cuve
- 4) Couper la partie du couvercle de la grande cuve délimitée par les traces de marqueur



- 5) Retourner la petite cuve et l'insérer dans la grande cuve pour vérifier si le glissement peut avoir lieu. Si ce n'est pas le cas, agrandir le trou de la grande cuve

4.4. Remarques

Le couvercle de la grande cuve peut ne pas être lisse. En suivant les irrégularités du couvercle, le report du diamètre de la petite cuve perdra donc en précision et il se peut que le trou effectué dans la grande cuve soit trop petit.

5. L'alimentation

Il s'agit ici de créer le système qui permettra l'alimentation en matière organique de la grande cuve.

5.1. Matériel

- Tube PVC de 90mm
- 1 coude de 90 mm
- 2 embouts de 90 mm
- 1 Ecrou de 90 mm
- 1 embout-écrou de 32 mm avec bouchon fourni avec la cuve

5.2. Outils

- Scie
- Marqueur
- Lime
- Colle PVC
- Silicone
- Teflon

5.3. Mode opératoire

- 1) Placer le bouchon de 32 mm à un des trous bas de la cuve et serrer avec la clef à molette



- 2) Couper 2 portions de tuyau de 90mm :
 - a. Une de 20 cm qui sera placée entre le coude et l'entrée de la cuve
 - b. Une qui sera découpée telle qu'une de ses extrémités sera insérée dans le coude et que son autre extrémité arrivera au même niveau que le sommet du couvercle de la grande cuve
- 3) Coller les tubes PVC dans le coude
- 4) Tracer un cercle de 90 mm de diamètre autour de la seconde sortie basse puis l'agrandir pour que l'embout et l'écrou de 90 mm puissent y être fixés
- 5) Fixer l'écrou et l'embout de 90mm sur la sortie agrandie et serrer avec la grande clef à mollette



- 6) Mesurer la partie filetée de l'embout qui dépasse de la cuve. Si celle-ci est plus longue que la partie taraudée du deuxième écrou de 90 mm alors raccourcissez-là.



- 7) Visser l'embout de 90 mm sur la partie filetée qui dépasse de la cuve
- 8) Coller le tuyau de 20 cm de long raccordé au coude à l'extérieur de de la cuve
- 9) Placer un soutien sous le tuyau afin de limiter les contraintes sur l'écrou et donc le risque de fuite



- 10) Si besoin, placer du silicone autour des sorties afin de parfaire l'étanchéité



5.4. Remarques

- Une vanne de 32 mm peut être placée à la place du bouchon afin d'en faciliter la vidange
- Dans le couple embout-écrou, l'un des 2 est souvent pourvu d'un joint en caoutchouc. La partie avec le joint doit être placée à l'intérieur. Si aucun joint n'est présent, un joint fabriqué à partir de caoutchouc de chambre à air fera l'affaire.
- Lors du serrage, vérifier la position des joints car ceux-ci ont tendance à se déformer et perdre leur circularité.
- L'étanchéité à l'eau est primordiale pour le bon fonctionnement du biodigester. Un serrage à la clef à molette est donc **obligatoire**.
- Le tuyau d'alimentation doit être le plus proche possible de la cuve afin de minimiser l'effet levier induit par le poids du liquide qui y stagnera

6. Le tube de sortie du digestat

Lors de cette 3^{ème} grande étape, un système de tuyaux sera mis en place afin d'évacuer les effluents liquides hors du biodigester.

6.1. Matériel

- Tube PVC de 50mm
- 1 Coude PVC de 50mm
- 1 Embout de 50 mm
- 1 Ecrou de 50 mm

6.2. Outils

- Scie
- Teflon
- Marqueur
- Colle PVC

6.3. Mode opératoire

- 1) Tracer un cercle de 50 mm de diamètre sur le haut de la paroi de la grande cuve. Ceci délimitera la hauteur maximale atteinte par le liquide dans la grande cuve et donc sa capacité



- 2) Découper le trou de 50 mm
- 3) Fixer l'écrou et l'embout de 50 mm autour de la sortie nouvellement créée
- 4) Découper 2 sections dans le tube PVC de 50mm. La première de 10 cm reliera l'écrou au coude. La seconde section doit être découpée telle qu'une des extrémités sera raccordée au coude et que l'autre atteigne le réservoir de récupération du digestat
- 5) Coller les tubes PVC et le coude
- 6) Coller le tube de 10 cm de long dans l'écrou



6.4. Remarques

- Veiller à ce que le système d'évacuation ne soit pas à la verticale du trou de l'alimentation ou du bouchon de sortie.
- Il faut veiller à ce que l'écrou/l'embout ne gêne pas la petite cuve lors de son glissement. Dans le cas contraire, un raccourcissement de l'écrou/embout est à effectuer.



- Mieux vaut que le tuyau reliant le coude et le réservoir soit trop court que trop long => il sera plus aisé de surélever le réservoir à digestat que de surélever la biodigesteur. Sur sol meuble, il est toujours possible de creuser un trou pour abaisser le réservoir au cas où le tuyau serait trop long
- Même remarque qu'au chapitre précédent par rapport à la position du joint de l'écrou et de l'embout

7. Le circuit de gaz

Le circuit de gaz permet de relier la partie haute de la petite cuve (donc le bas de celle-ci lorsqu'elle est posée sur son fond)) au brûleur. Un robinet et une vanne sont placés dans ce circuit afin de gérer le flux de biogaz et de garantir la sécurité de l'utilisateur. L'autre trou de la cuve sera muni d'un bouchon.

7.1. Matériel

- 2 écrous PVC de 32 mm (taille de la sortie du tank)
- 2 embouts PVC de 32 mm
- 1 bouchon PVC de 32 mm
- 5 cm du tuyau de 32 mm
- 1 réducteur de diamètre 32-20 mm
- Tuyau à gaz

- 6 tétons de raccordement mâle 20 mm
- 1 robinet à gaz femelle-femelle 20 mm (si c'est un mâle-mâle, 4 tétons de raccordement mâle sont nécessaires)
- 1 brûleur à gaz

7.2. Outils

- Silicone
- Teflon
- Scie

7.3. Mode opératoire

- 1) Fixer 1 écrou et son embout de 32 mm à une des sorties de la petite cuve
- 2) Coller le morceau du tuyau de 32 mm dans l'embout
- 3) Coller le bouchon sur le morceau de tuyau



- 4) Fixer l'autre embout et l'écrou PVC de 32 mm à l'autre sortie
- 5) Placer le réducteur 32/20 sur l'écrou pvc
- 6) Visser l'embout mâle de 20 mm sur le réducteur
- 7) Placer un morceau de tuyau à gaz de 5 cm sur le téton et y raccorder la vanne (ici le robinet a été raccordé pour les tests d'étanchéité en attendant la livraison de la vanne). La vanne peut aussi être directement fixée sur la partie fileté du réducteur.



- 8) Siliconer les 2 sorties
- 9) Après le séchage du silicone et les tests d'étanchéité effectués, finir le circuit à gaz et le raccorder au brûleur



7.4. Remarques

- Attention à laisser le tuyau à gaz libre de bouger lorsque la cuve monte et descend
- Un piège à eau peut être ajouté au point bas du système afin d'éviter de devoir en faire une vidange manuel lors du bouchage du système.

8. Structure de maintien de la cuve retournée

La cuve dans laquelle le biogaz sera stocké va monter au fur et à mesure que le biogaz est produit. Une structure de sécurité doit être placée afin d'empêcher tout basculement de cette cuve.

8.1. Matériel

- Corde plate
- Tube PVC de 32 mm
- 4 coudes de 32 mm

8.2. Outils

- Scie
- Colle PVC

8.3. Mode opératoire

- 1) Couper 2 x 2 sections du tuyau de 32 mm. Les 2 premières doivent être de longueur égale et cette longueur doit être la somme de la hauteur de la grande cuve et de la petite cuve lorsque celle-ci est dans sa position la plus haute (retrancher 10 cm à cette longueur comme marge de sécurité). Les 2 autres sections doivent être 5 cm plus longues.
- 2) Percer les tuyaux à hauteur des rainures de la cuve où passera la corde plate.



- 3) Couper 2 sections du tuyau de 32 mm. Leur longueur doit être égale au diamètre de la grande cuve + 5 cm
- 4) Prendre les longs tubes de PVC de 32mm et coller à chaque tube un coude PVC de 32 mm. Si vous n'avez pas assez de côtés femelles, un agrandissement est possible en chauffant les tubes



- 5) Coller les sections de tuyaux horizontaux dans les coudes
- 6) Couper la corde plate en 2
- 7) Placer la structure et attachez-la avec la corde en veillant à assurer un serrage maximum



8.4. Remarques

- Si la cuve utilisée n'est pas pourvue de rainure, un système de 2 cercles en fer plat serré sur la cuve peut être installé afin d'y fixer les tubes PVC.

9. Essais d'étanchéité

9.1. Etanchéité à l'eau

Remplir la grande cuve d'eau, marquer le niveau de l'eau. Revenir après quelques heures et vérifier le niveau de l'eau. Faire cet essai sur un sol où les taches d'humidité sont visibles facilitent l'identification des fuites (béton, terre...). Il est normal d'observer de légères fuites durant les premières minutes du test.

En cas de non-étanchéité, le serrage des écrous doit être augmenté et leurs joints inspectés. Le tuyau d'alimentation doit être soutenu afin d'être parallèle à la paroi de la cuve. Si ceci n'est pas respecté, veiller à rétablir la situation en soutenant le tuyau d'alimentation avec un support solide non déformable.

9.2. Etanchéité à l'air

Après avoir rempli la grande cuve d'eau et vérifié son étanchéité, placer la petite cuve retournée dans la grande cuve. Une fois le niveau stabilisé, noter la hauteur de la cuve. Après 12h, relever la hauteur de la cuve. Si celle-ci est plus basse qu'avant, une fuite d'air est présente.

Dans ce cas, les joints doivent être inspectés à l'eau savonneuse et remplacer si besoin.

10. Lancement du biodigester

- 1) Placer 250 kg de bouse de vache (un mélange de farine/graisse et de bouse de vache ou du digestat d'un autre biodigester convient aussi si les quantités de bouse disponibles sont faibles) dans la grande cuve puis ajouter de l'eau (le niveau doit être 20 cm en

dessous de la sortie des effluents liquides afin d'éviter tout débordement lorsque la petite cuve sera insérée).

- 2) Mélanger jusqu'à obtenir une consistance homogène, sans résidu solide
- 3) Ouvrir le robinet de gaz de la petite cuve
- 4) Retourner la petite cuve et la faire glisser lentement dans la grande cuve pour laisser l'air s'échapper et éviter tout débordement jusqu'à atteindre le point bas
- 5) Fermer le robinet
- 6) Si vous avez un analyseur de gaz, effectuez un suivi quotidien de la composition du gaz à l'intérieur de la petite cuve en plaçant l'appareil de mesure dans le robinet à gaz.
- 7) Après une dizaine de jours ou lorsque la concentration en méthane atteint 30%, faire un test d'allumage du gaz avec le brûleur.



- 8) Si le gaz brûle, attendez une semaine supplémentaire avant de l'alimenter quotidiennement en déchets de cuisine.
- 9) Si le gaz ne brûle pas, attendez quelques jours supplémentaires. Si le gaz ne brûle toujours pas, l'étanchéité à l'air doit être testée à nouveau. Si elle est garantie, insérer davantage de bouse de vaches dans le biodigester (1 volume de bouse pour 1 volume d'eau).

11. Utilisation du biodigester

Remplissage journalier : 2 à 3 seaux de 10 litres (1 seau = 1 portion d'eau pour 1 portion de déchet organique → temps de séjour de 40 à 60 jours)

Matière insérée : reste alimentaire, graisse... à broyer et à température ambiante (laisser refroidir l'huile par exemple). Éviter la viande et le poisson, riche en résidus soufrés.

3. Datasheets des analyseurs de gaz

3.1. Gembio

GEMBIO

ANALYSEUR PORTABLE

Conçu pour l'analyse des biogaz

Solution flexible pour les mesures de contrôle

Mesures simultanées de

- O₂ 0 - 25 % ,
(électrochimique 3-5 ans)
- CH₄ 0 ... 100 %
(cuvette IR 2 gaz)
- CO₂ 0 ... 100 %
(cuvette IR 2 gaz)
- H₂S 0 ... 2.000 ppm
(électrochimique /10 000ppm)
- Pression
0 ... ± 300 hPa/ mbar





Gruter et Marchand

Des produits leaders pour l'analyse de gaz et la mesure dimensionnelle de précision.

GEMBIO

- Menu d'utilisation du logiciel par touches fonctions
- Boîtier design moderne, petites dimensions avec fixations magnétiques
- Écran couleur 3,5" TFT
- Pot à condensats intégré avec filtre PTFE et éclairage
- Lecteur de carte SD avec mémorisation
- Interface USB pour transfert de données vers PC et pour charge accu
- Connecteurs de gaz en acier inoxydable robustes
- Accu Lithium-ion intégré pour 6 h de fonctionnement



Données techniques

Valeurs mesurées	Plages de mesures	Précision
Oxygène O ₂ (longue durée de vie)	0...25 Vol-% abs., résolution 0,1 %	+ 0,2 Vol-% abs
Dioxyde de carbone CO ₂	0...100 %	+ 0,3 % ou 5 % valeur lue
Methane CH ₄	0...100 %	+ 0,2 % ou 5 % valeur lue
Dioxyde de soufre H ₂ S	0... 2.000 ppm, résolution 1 ppm, ou 10000ppm	± 5 ppm ou 5 % valeur lue
Pression	- 300 ... + 300 hPa	± 0,02 hPa

Données techniques générales

Température de fonctionnement	+ 5° C ... 45 °C, humidité max 95%, non condensée
Température de stockage	- 20 ... + 50 °C
Alimentation électrique interne	Piles lithium-ion 6 heures min. de fonctionnement
Alimentation électrique externe	Adaptateur universel 100 - 240 Vac / 50 60 Hz
Protection	IP 20
Poids	environ 750 g
Dimensions	110 x 225 x 52 mm

Option Combustion	Plages de mesures	Précision
Monoxyde de carbone CO	0...300/4000/10000 ppm	+/- 1ppm ou 5% valeur lue
Monoxyde d'azote NO	0...1000 ppm	+/- 1ppm ou 5% valeur lue
Dioxyde d'azote NO ₂	0...200 ppm	+/- 1ppm ou 5% valeur lue



GRUTER & MARCHAND
22/24 Rue Lavoisier 92000 NANTERRE
Tél : +33 (0)1 47 21 56 81
Mail : contact@gruter-et-marchand.com

Données techniques sujettes à modifications
W-100003FR-KO-XX-046

3.2. Gasboard 3200 L



Products: Portable Infrared Biogas Analyzer—Gasboard 3200L

Category: Biogas analyzer

General Parameter	
Measurement	CO ₂ , CH ₄ , H ₂ S, O ₂
Technology	CO ₂ , CH ₄ (NDIR)
	H ₂ S, O ₂ (ECD)
Range	CO ₂ : 0-50%, CH ₄ : 0-100%
	H ₂ S: 0-9999ppm, O ₂ : 0-25%
	(Note: measurement range can be customized.)
Resolution	CO ₂ , CH ₄ , O ₂ : 0.01%, H ₂ S: 1ppm
Precision	CO ₂ , CH ₄ : ≤1%FS
	H ₂ S, O ₂ : ≤2%FS
Repeatability	CH ₄ , H ₂ S, CO ₂ , O ₂ ≤1%
Gas flow	0.7-1.2 L/min
Inlet pressure	2kPa-50kPa
Sampling gas condition	no dust, no water, no tar
Response time(T90)	<10s (NDIR)
Communication interface	RS-232
Power supply	built-in rechargeable lithium battery
Working Environment	
Work temperature	0-50°C
Relative humidity	≤95% non condensing
Ambient pressure	86-108kPa
Dimensions	
Dimension	295*196*62mm (L*W*H)
Weight	5kgs

3.3. Gasboard 3200 plus



HANDHELD BIOGAS ANALYZER

Gasboard-3200 plus



Applications

- Landfill site
- Waste water treatment
- Bio-methane plant
- CDM project
- Anaerobic digestion
- Fermentation processes

Benefits

- Modular NDIR and electrochemical sensors design
- Temperature and pressure compensation
- light-weight design for easy carrying among different sites
- Optional gas conditioning device for measuring biogas with heavy vapor
- Bluetooth communication with mobile APP

Features

- Up to 6 gases measuring: CH₄, CO₂, H₂S, O₂ as standard items; H₂, CO as optional items
- Optional biogas flow measurement
- Accuracy for CH₄ and CO₂: +/- 2%FS; O₂, H₂S, H₂, CO: +/- 3%FS
- Precision filters to remove moisture and dust in sample gas for analyzer's protection
- Rechargeable Lithium battery supports up to 7 hours continuous working
- Mobile APP supports measuring operation and remote diagnosis
- GPS positioning and location: easy on history data tracking

Hubei Cubic-Ruiyi Instrument Co., Ltd

Tel: +86-27-81628831 Fax: +86-27-87401159

Email: info@gasalyzer.com.cn Website: www.gas-analyzers.com, www.gasalyzer.com.cn

SPECIFICATIONS

Components	CH ₄ , CO ₂	NDIR
	O ₂ , H ₂ S	ECD
	H ₂ and CO (optional)	ECD
	Gas flow (optional)	Thermal mass flow probe
Range	CH ₄	0~100 %
	CO ₂	0~50 %
	O ₂	0~25 %
	H ₂ S	0~10000 ppm (can be customized)
	H ₂	0~2000 ppm
	CO	0~2000 ppm
Accuracy	CH ₄	±2%FS
	CO ₂	±2%FS
	O ₂	±3.0%FS
	H ₂ S	±3.0%FS
	H ₂	±3.0%FS
CO	±3.0%FS	
Lithium battery pack	Rechargeable	
Power supply	5 V/ 2A DC	
Flow	(0.7-1.2) l/min	
GPS sensor	Positioning and location	
Ambient pressure	(700 ~ 1200) mbar	
Relative humidity	0~95% no-condensation	
Dimension	276 × 195 × 66 mm (Length×width×height)	
Display	High-resolution colored 3.2-inch	
Communication	USB port, blue tooth 4.0	



3.4. IRCD 4



Beijing Shi'An Technology Instrument Co., Ltd

北京时安科创仪器有限公司

May Min

Skype: may_8556

ventes@shiantech.com

Tel: 86-17744462056

Portable Biogas Analyzer

Specifications

Model	IRCD4			
Gas Detected	Methane CH ₄	Carbon Dioxide CO ₂	Hydrogen Sulfide H ₂ S	Oxygen O ₂
Detection Principle	Specilized 2 IN 1 Infrared Sensor, imported from UK; SGX; 5 Years life span		Electrochemical UK sensor; Alpha; 2 years life span	Electrochemical UK sensor, Alpha; 2 years life span
Sampling Method	Natural diffusion type			
Detection Range	(0-100)%VOL	(0-100)%VOL	*(0-2000)PPM	(0.0-30.0)%VOL
Precision Accuracy	1%VOL	1%VOL	1PPM	0.1%VOL
Operating Temperature	-25°C~+55°C, Short time: -40°C~+55°C			
Chargeable Battery	PL123450, 3.7V/1500mA			
Display	LCD Display with backlight			
Alarm Mode	Sound & Light Alarm; Full range adjustable			
Explosion-Proof	Intrinsically safe, Exibd I(CMExC)			
Degree of Protection	IP65			
Dimensions	130x66x30 mm			
Weight	250g (device itself); 600g(including standard accessories)			
Standard Accessories	English User's Manual; USB charger and adapter; Calibration Cap and tube; Calibration Certificate; Hanging Cord; Protection Leather Case, Professional Carrying Case			

H₂S sensor can overload to 10,000PPM in Short time.

Standard Accessory



- ★ English User's Manual
- ★ Charging Stand
- ★ Calibration Cap and tube
- ★ Leather Case
- ★ Hanging Cord
- ★ Back Clip
- ★ Professional Carrying Case
- ★ Calibration Certificate

Optional Accessories (Extra Charge)

Gas sampling pump with filter and probe



Connect biogas analyzer with Probe

1. Help to pump the gases out of long distance or deep wells.
2. Avoid gas leakage and errors when testing.
3. With built-in filter makes it humidity and dust proof.

Data transfer and logger



Comes with a CD, installing the software onto your computer.

1. Can transfer real-time data from the device to your personal PC.
2. Can continuously store history data , at least 2000 records in total.

Beijing Shi'an Technology Instrument Co.,Ltd
shiantech.en.alibaba.com
ventes@shiantech.com

4. Tâches à réaliser à la suite du projet

Projet biogaz : Suite

Ce document vise à répertorier l'ensemble des tâches à effectuer à la suite du stage de fin d'études de Martin MOISSE, effectué lors du premier quadrimestre de l'année académique 2019-2020. Ces tâches sont énoncées dans leur ordre de priorité.

Table des matières

1. Achat d'appareils de mesure	106
2. Gestion du digestat sur le site de Ganvié.....	106
3. Traitement des déchets de cuisine sur le site de Ganvié.....	107
4. Broyage des déchets	107
5. Création d'un piège à eau	108
6. Mise en place d'une station flottante.....	108
7. Modification à effectuer lors de la vidange du biodigesteur	108
8. Etude du pouvoir méthanogène d'un matériau	109
9. Caractérisation et valorisation du digestat	109
10. Raccordement des toilettes de l'hôtel au biodigesteur.....	109

1. Achat d'appareils de mesure

L'UAC possède déjà un thermomètre et un analyseur de gaz. Afin de permettre un suivi complet des unités de biogaz, l'achat d'un pH mètre et d'un débitmètre sont à effectuer au plus vite.

2. Gestion du digestat sur le site de Ganvié

Dans l'immédiat, seul un jerrycan de 35 litres est installé pour réceptionner le digestat. Etant donné que l'apport quotidien dans le biodigesteur sera de 20 à 30 litres, une solution doit être trouvée afin d'éviter une manutention trop chronophage.

Une première solution serait de relier la sortie à un baril de 200l. Ainsi, la récupération du digestat pourra se faire de manière hebdomadaire.

Une seconde solution serait la mise en place d'un bac sans couvercle d'une contenance de 150-200l relié à la sortie du digestat. Ce bac serait recouvert d'un plexiglas percé de petits trous. Ainsi, un effet de serre pourra avoir lieu et l'eau présente pourra s'évaporer. La quantité de digestat à gérer sera donc réduite. Cependant, ce système implique que le digestat qui a été séché un jour sera à nouveau humidifié par le digestat qui sera injecté dans le système le jour suivant.

A long terme, un système de séchage plus développé devra être testé. Des bacs de faible contenance placés en parallèle sont une solution. Une vanne commandée dirigera le digestat vers un de ces bacs. Le jour suivant, la vanne mènera le digestat vers un autre bac, etc. Une fois le cycle terminé et tous les bacs remplis, le premier bac sera vidé et le cycle pourra recommencer. Ainsi, le digestat aura le temps de sécher et ne recevra pas continuellement de la matière humide.

D'autres possibilités sont bien sûr à explorer.

3. Traitement des déchets de cuisine sur le site de Ganvié

Une fois l'inoculation du biodigester terminée (40-50% de CH₄), la valorisation des déchets de cuisine devra être étudiée. Pour un fonctionnement optimal (30-50 j de temps de séjour pour la matière), entre 20 et 40 litres devront être insérés dans le biodigester quotidiennement. Parmi ces 20 à 40 litres, la moitié devra être des déchets de cuisine solide broyé (pâte, riz, légumes...) et l'autre moitié de l'eau qui permettra de mieux solubiliser la matière et ainsi, favoriser le travail des bactéries méthanogènes.

Si la quantité de déchets fournie sur le site étudié venait à être insuffisante, les ménages alentours pourraient être invités à garder leurs déchets pour nous les fournir

Un suivi devra être fait 2 à 3 fois par semaine afin de vérifier le bon fonctionnement du biodigester. En cas de ralentissement de la production et de non variation du pH, de la bouse de vache pourra être insérée dans le biodigester afin d'augmenter la population de bactéries méthanogènes. En cas de ralentissement de la production accompagnée d'une baisse du pH, un traitement à la chaux devra être effectué.

4. Broyage des déchets

Pour accroître la vitesse production et éviter tout risque de colmatage, un broyeur devra être créé. Il s'agira d'un broyeur inspiré des « low-techs », c'est-à-dire sans recours à l'énergie

fossile mais qui permettra toutefois de décupler la force de l'utilisateur par un système ingénieux (volant d'inertie, système à pédale-chaîne...).

5. Création d'un piège à eau

Au point bas du tuyau d'alimentation en biogaz, un raccord 3 voies devra être installé. Une des voies doit être dirigée vers le sol. A ce raccord, un piège à eau sera installé afin d'éviter toute accumulation d'eau dans le tuyau de gaz.

6. Mise en place d'une station flottante

Pour la suite du projet, la construction d'une station flottante accueillant le biodigester est envisagée. Cette station devra répondre à différents critères tels que notamment :

- Résister à la corrosion induite par l'eau saumâtre
- Avoir une durée de vie supérieure à celle du biodigester
- Assurer sa flottaison lorsque 7 opérateurs et leur matériel sont dessus en plus du biodigester (soit un peu moins de 2 tonnes)
- Permettre de suivre la variation du niveau de l'eau qui se produit entre la saison humide et sèche
- Ne pas dériver
- Résister à une collision à faible vitesse avec une embarcation

Une station composée de tubes PVC sous lesquels sont placés des tonneaux en plastique de 200 litres est à l'étude. Des maquettes à petite échelle peuvent être réalisées afin d'effectuer des essais de design et de flottaison.

7. Modification à effectuer lors de la vidange du biodigester

Une fois la plateforme flottante mise en place, le biodigester sera vidangé et quelques modifications pourront être effectuées :

- 1) Mettre le robinet de gaz près du brûleur et la vanne de gaz en sortie du biodigester
- 2) Mise en place d'un rail de guidage de la cuve de gaz si le système actuel ne satisfait pas aux exigences d'utilisation (le découpage de morceaux de polyéthylène collés sur la cuve de biogaz et percé de trou de même diamètre que les tuyaux de guidage permettra la mise en place d'un tel système)
- 3) Système de racleur afin de nettoyer la cuve de gaz lorsqu'elle s'élève

- 4) Trou dans la cuve à gaz et installation d'un tuyau afin de permettre une mesure de la température au centre de la cuve
- 5) Surveillance de la déformation de la cuve => installer un anneau en métal autour de la grande cuve si des déformations sont à déplorer

8. Etude du pouvoir méthanogène d'un matériau

Les microbiodigesteurs actuellement testés à l'UAC sont convaincants. Une fois tout le matériel de mesure acquis, des tests poussés pourront être effectués afin de déterminer le pouvoir méthanogène d'un intrant donné.

Pour ce faire, il faudra connaître précisément le pouvoir méthanogène d'une quantité donnée de bouse de vache. Ensuite, la matière à tester sera mélangée à cette quantité connue de bouse de vache et mis dans le micro-biodigester où on veillera à laisser le moins d'oxygène possible (ajouter de l'eau pour chasser un maximum d'oxygène). Des mesures quotidiennes à heures fixes permettront de déterminer la production de biogaz ainsi que sa qualité. Après chaque mesure, la poche de stockage de biogaz sera vidée afin de ne pas mélanger le biogaz de 2 jours successifs. Une fois que la production devient presque nul, un graphique de production pourra être établi pour toute la durée de production. La production inhérente à la bouse de vache pourra alors être retranchée.

En complément de cette analyse, il est important de déterminer le pourcentage de matière sèche dans la matière testée. En effet, c'est cette matière uniquement qui produit le biogaz, connaître sa valeur permettra d'établir la production de biogaz/kg de matière sèche de l'intrant étudié.

9. Caractérisation et valorisation du digestat

Afin de permettre une valorisation du digestat, il devra être analysé en laboratoire. Ensuite, en fonction des minéraux qui s'y trouvent, un catalogue de plantes compatibles avec ce fertilisant devra être élaboré. La transformation du digestat séché en provende devra aussi être envisagée dans le cas des installations piscicoles.

10. Raccordement des toilettes de l'hôtel au biodigester

Il s'agira tout d'abord de quantifier la matière fécale moyenne produite quotidiennement dans l'hôtel. Ensuite, en fonction de ces données, 2 cas de figure se posent. Le premier est que la quantité de matière fécales est faible (moins de 5kg). Le biodigester peut donc continuer à être utilisé tel quel. A l'inverse, si la quantité de matière fécale produite est trop élevée, il y a un

risque de « lavement » du biodigesteur : les bactéries seront évacuées plus vite qu'elles ne se reproduisent. Il faudra alors augmenter sa capacité en plaçant un second biodigesteur en série ou à part si le digestat s'avère être contaminé par exemple.

Le digestat produit par un tel système devra être étudié minutieusement afin de vérifier qu'il puisse être utilisé comme amendement sans risque sanitaire.