

TECHNIQUE

HELMO
Haute Ecole
Libre Mosane

Gramme

Travail de Fin d'Etudes

en vue de l'obtention du grade de

Master en Sciences de l'Ingénieur Industriel

Finalité : **Génie Energétique Durable**

Développement d'un digesteur de surface pour l'intégration alternative du biogaz au Burkina Faso

Tuteur Gramme

Christian CHARLIER
Chargé de cours

Tuteur Entreprise

Charles Didace KONSEIBO
Chef de département

CEAS Burkina

Rue 17.67
3306 Ouagadougou 1, Burkina Faso

Mémoire présenté par

Benoît HAUSMAN

Défense publique le
20 juin 2018



ABSTRACT

Développement d'un digesteur de surface pour l'intégration alternative du biogaz au Burkina Faso.

Au Burkina Faso, comme dans le reste de l'Afrique ou autres pays en voie de développement, l'accès à l'énergie reste difficile, et il constitue incontestablement un enjeu important dans le développement et l'amélioration des conditions de vie de la population.

Dans ce contexte difficile, les énergies renouvelables et en particulier le biogaz offrent une possibilité majeure de faciliter cet accès à l'énergie. La biométhanisation participe ainsi activement au développement des pays du sud tout en préservant l'environnement car elle limite fortement le déboisement et permet de gérer les déchets.

L'année précédente, un projet de développement d'un digesteur de surface de petite taille et abordable pour les populations rurales du Burkina Faso a vu le jour.

Le présent travail fait suite à la première phase du projet et son objectif est de poursuivre les développements entrepris lors de la phase antérieure afin d'obtenir un prototype plus performant, facile d'utilisation et prêt à être éprouvé sur le terrain.

Ce travail a également pour but d'approfondir l'étude de l'intégration du biogaz au contexte des pays en voie de développement et en particulier celui du Burkina Faso. La documentation et les investigations menées ont permis d'élargir le point de vue et de faire le point sur les technologies existantes et leur implémentation.

Mots clés : biométhanisation, digesteur domestique, voie humide, Burkina Faso, biogaz, énergies renouvelables, traitement des déchets.



ABSTRACT

Development of an above-ground biodigester for alternative integration of biogas in Burkina Faso.

In Burkina Faso as well as in the rest of Africa or in other developing countries access to energy remains difficult and it constitutes undoubtedly an important issue in the development and the improvement of the life conditions of the population.

In this difficult context, renewable energies and specifically biogas offer a major possibility to facilitate that access to energy. So, the biomethanisation participates to the development of the Southern countries while preserving the environment since it limits strongly the deforestation and opens the way to the waste management.

The previous year, a project of development of small size ground digester and affordable for the rural population of Burkina Faso has been started.

The present work follows this first phase of the project and its goal is to pursue the developments undertaken during the first phase in order to obtain a prototype more efficient, easy to use and ready to be tested at the field level.

This work has also the goal to deepen the study of the biogas integration in the context of the developing countries, specifically the Burkina Faso's one. The documentation and the investigations which have been led have allowed to widen the perspective and to update the existing technologies and their implementation.

Key words: methanisation, domestic digester, wet process, Burkina Faso, biogas, renewable energies, waste treatment.



REMERCIEMENTS

Le présent travail a été avant tout un travail d'équipe. De plus, il n'aurait pas été possible sans les échanges, les rencontres et l'aide de nombreuses personnes. C'est pourquoi avant toutes choses, je tiens à adresser mes remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie tout d'abord l'équipe de CEAS Burkina pour son accueil chaleureux et son soutien. Un remerciement spécial s'adresse à mon tuteur entreprise, M. Charles Didace Konseibo, ainsi qu'à M. Yamako Soulama pour la collaboration constructive, le soutien technique et les encouragements. Un grand merci également à M. Henri Ilboudo, directeur du CEAS Burkina, pour sa confiance et son accueil au sein de l'entreprise.

Je tiens également à remercier le docteur Bertrand Kaboré pour sa disponibilité, sa convivialité et son soutien en dehors du CEAS.

Mes remerciements vont aussi aux experts techniques de la SNV, M. Jan Lam, et du PNB-Bf, Mme. Gwladys Sandwidi, pour leur aide précieuse, leurs conseils très pertinents, leur collaboration positive dans ce projet.

J'adresse également mes remerciements à l'équipe de l'Université d'Abomey-Calavi, en particulier M. Basile Kounouhewa, M. Clément Kouchadé et M. Gabin Koto N'Gobi pour leur accueil, leur écoute et les échanges fructueux concernant leur projet.

Ensuite, je tiens à adresser tout particulièrement ma gratitude à mon promoteur pour ce travail, M. Christian Charlier, pour ses conseils, son suivi, ses révisions et son aide ô combien précieuse tout au long du stage et du travail.

Je remercie également le relecteur de ce travail, M. Raymond Michel, pour sa disponibilité et sa contribution à la finalisation du manuscrit.

Mes ultimes remerciements vont à la bourse Fame pour le soutien financier qu'elle m'a offert pour ce stage et à la cellule Sud-Nord de HELMo pour les projets et les liens qu'elle crée avec les pays en voie de développement sans lesquels ce stage n'aurait pas été possible.

Je ne peux cependant pas oublier mes professeurs Mme Anne-Michèle Janssen, M. Olivier Praz, M. Lousberg, M. Theunissen ainsi que tous ceux qui ont contribué à rendre mon cursus



à Gramme convivial et qui ont fait de ma formation en Génie Energétique Durable une formation de qualité.

Ces remerciements ne pourraient se clôturer sans un merci tout spécial à mon entourage et mes proches, en particulier ma famille et Ophélie pour leur patience et leur soutien tout au long de mon cursus et durant ce travail de fin d'études.



AVANT-PROPOS

Ce travail de fin d'études, réalisé au *Centre Écologique Albert Schweitzer du Burkina Faso*, s'inscrit totalement dans la continuité de celui réalisé l'an passé par Nicolas Zimmermann. Son but étant de poursuivre (et même de finaliser) le développement d'une unité de biométhanisation de surface en voie humide à partir de barriques métalliques adaptée au contexte rural du Burkina Faso.

La première partie du stage a été consacrée à un travail de documentation et d'investigation. Celle-ci a permis d'élargir le champ de vision que nous avons sur le biogaz domestique dans les pays du sud grâce notamment à la rencontre avec le *Programme National des Biodigesteurs du Burkina Faso*. Elle nous a également ouvert les yeux sur certaines contraintes et limites de l'utilisation du biogaz domestique. Ce sont, entre autres, ces dernières informations qui nous ont poussés à remettre en cause l'installation d'un biodigesteur sur le site de la clinique du docteur Bertrand Kaboré.

La seconde partie du travail consistait à poursuivre le développement des unités de biométhanisation conçues lors de la première phase. Fort de nos recherches, nous avons entièrement revu la conception des digesteurs afin d'obtenir une nouvelle unité (toujours de 1 m³) plus facile d'utilisation, plus facile à réaliser et à maintenir, plus productive, moins chère et par-dessus tout modulable. La production attendue s'élève à 144 litres de biogaz par jour. Lors de l'expérimentation nous avons observé une production quotidienne de 380 litres de biogaz. Celle-ci correspond à la phase de lancement qui produit davantage.

Le stockage étant un point clé de l'utilisation de biogaz, un prototype de système de stockage a également été conçu et réalisé au centre. Celui-ci est simple d'utilisation et est capable de contenir de 2 à 5 jours de production du digesteur modulable (soit 770 litres).

Ensuite, nous avons réalisé des essais de cuisson et d'éclairage afin de déterminer à quels besoins peut répondre la production de l'unité. Celle-ci permet la préparation d'un repas tous les 2 jours, cependant la pression de sortie est trop faible pour alimenter certaines lampes.

Pour terminer, nous avons comparé les digesteurs conçus au cours de ce travail aux digesteurs enterrés à dôme fixe. Cette comparaison a permis de mettre en évidence les avantages et inconvénients de chaque système ainsi que leur complémentarité sur le marché.



TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	1
2. Contexte du projet.....	5
2.1. La situation du Burkina Faso	5
2.1.1. Climat et environnement.....	6
2.1.2. Niveau de développement	7
2.1.3. Disparités entre le milieu rural et urbain	8
2.1.4. Approvisionnement énergétique.....	9
2.1.5. Politiques énergétiques du Burkina Faso	10
2.2. Présentation du CEAS Burkina	12
2.2.1. Historique.....	12
2.2.2. Secteurs d'activités	12
2.2.3. Le projet Energy for Life Burkina	13
2.3. Le lien historique.....	14
2.4. Résumé du précédent travail de fin d'études.....	15
3. Intégration de la biométhanisation domestique en milieu rural	17
3.1. Le biogaz domestique et le développement durable	17
3.1.1. Aspects environnementaux	17
3.1.2. Aspects sociaux.....	18
3.1.3. Aspects économiques	19
3.2. Rappels généraux sur la méthanisation	20
3.3. Modèles de réacteur	21
3.4. Régime de fonctionnement (continu/batch)	22
3.5. Taux de matières sèches	23
3.6. Temps de rétention hydraulique	24



3.7.	Principes de dimensionnement	25
3.8.	Agriculture et biométhanisation	26
3.8.1.	Description de l'effluent	26
3.8.2.	Utilisation de l'effluent	27
3.8.3.	Effets sur les cultures.....	29
3.8.4.	Effets sur le sol.....	29
3.9.	Conditions pour la mise en place de biodigesteurs	31
3.9.1.	Température	31
3.9.2.	Disponibilité du substrat.....	32
3.9.3.	Disponibilité en eau	33
3.9.4.	Intérêt de la population	33
4.	Intégration de la biométhanisation dans le cadre de la clinique.....	35
4.1.	Analyse des besoins en énergie de la clinique.....	35
4.1.1.	Situation existante	35
4.1.2.	Besoins en électricité.....	35
4.1.3.	Besoins en chaleur	36
4.2.	Intégration d'un biodigesteur sur le site.....	37
4.2.1.	Conditions à remplir	37
4.2.2.	Utilisation du biogaz	38
4.2.3.	Conclusion.....	38
4.3.	Alternatives pour l'approvisionnement énergétique	39
5.	Présentation du Programme National des Biodigesteurs du Burkina Faso.....	40
5.1.	Historique.....	40
5.2.	Objectifs du Programme National	41
5.3.	Les digesteurs du Programme National.....	42



5.3.1.	Origines et choix de la technologie.....	42
5.3.2.	Conception.....	43
5.3.3.	Principe de fonctionnement.....	43
5.3.4.	Configuration.....	44
5.3.5.	Caractéristiques techniques.....	46
5.4.	Les activités du Programme National.....	46
5.5.	Les résultats du Programme National.....	47
6.	Travail réalisé au sein du CEAS Burkina.....	49
6.1.	Objectifs.....	49
6.1.1.	Objectifs poursuivis par le CEAS Burkina.....	49
6.1.2.	Objectifs du présent travail de fin d'études.....	50
6.2.	Expérimentation du réacteur existant.....	50
6.2.1.	Travail préparatoire.....	51
6.2.2.	Expérimentation de l'unité existante.....	52
6.2.3.	Estimation du prix.....	56
6.2.4.	Remarques, observations et interprétations.....	58
6.3.	Essais de cuisson et d'éclairage.....	58
6.3.1.	Mode opératoire.....	59
6.3.2.	Résultats des expérimentations.....	61
6.4.	Conception d'un nouveau digesteur.....	64
6.4.1.	Conception.....	65
6.4.2.	Réalisation de l'unité.....	69
6.4.3.	Expérimentation du nouveau système.....	72
6.4.4.	Estimation du prix.....	77
6.4.5.	Pistes d'améliorations.....	79



6.5.	Conception d'un système de stockage	83
6.5.1.	Conception.....	85
6.5.2.	Réalisation.....	86
6.5.3.	Expérimentation	89
6.5.4.	Estimation du prix.....	91
6.5.5.	Pistes d'améliorations.....	92
7.	Comparaison des technologies biodigestives.....	94
7.1.	Résumé de l'étude comparative des différents digesteurs domestiques existants ..	94
7.2.	Comparaison de la technologie développée et du digesteur à dôme fixe	96
8.	Pour aller plus loin : expérience au Bénin.....	99
8.1.	Visite des cités lacustres	99
8.2.	Le projet de l'université d'Abomey-Calavi	101
8.3.	Visite du centre Songhaï de Porto-Novo.....	104
9.	Conclusion.....	108
10.	Liste des abréviations	110
11.	Références.....	112
12.	Annexes.....	115
12.1.	Caractéristiques techniques des digesteurs du PNB-Bf	115
12.2.	Fiche technique du compteur à gaz résidentiel Gallus	116
12.3.	Calcul d'erreur sur le volume de gaz consommé et produit	120
12.4.	Dimensionnement du prototype de digesteur modulable	123
12.5.	Plans de fabrication des cuves du digesteur modulable	127
12.6.	Plans de fabrication du digesteur modulable 2.0.....	130
12.7.	Plans de fabrication du système de stockage	131
12.8.	Prédimensionnement du digesteur à polytank.....	133



12.9. Plans du digesteur à polytank135



1. INTRODUCTION

Le « développement durable » associe deux concepts qui au cours des deux derniers siècles se sont systématiquement opposés à savoir le *développement* (au sens large c'est-à-dire technique, social et économique) et le *respect de l'environnement*.

En effet, depuis la révolution industrielle, les pays occidentaux ont systématiquement accru de manière exponentielle leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) ainsi que leur consommation de ressources non renouvelables. Aujourd'hui, les pays industrialisés ont donc atteint un niveau de développement respectable mais sont devenus les principaux responsables des dérèglements climatiques que nous connaissons.

À l'opposé, les pays non industrialisés ou en voie de développement (PVD), eux, ont une empreinte écologique plus faible. Cependant, ces pays sont peu développés et leurs populations souffrent de pauvreté voire de misère et vivent dans des conditions la plupart du temps très difficiles. Au fur et à mesure que ces pays se sont développés, leur empreinte écologique a inévitablement augmenté. En 2008, l'empreinte écologique moyenne de l'Afrique a atteint 1,5 (comme le montre la figure ci-dessous). Cela signifie que le continent consomme 50% de ressources en plus que ce que la Terre peut lui fournir.

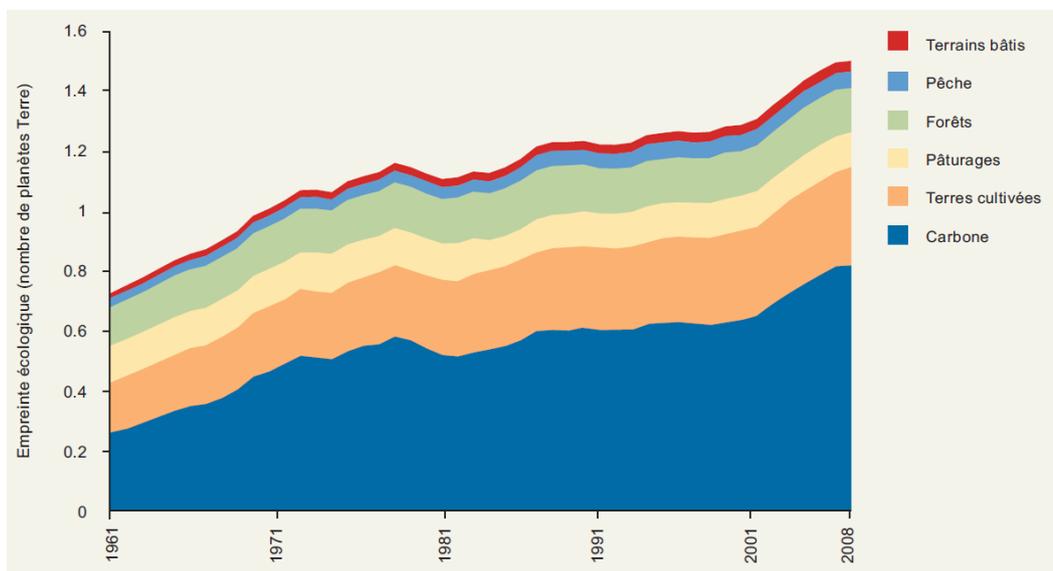


Figure 1 : Évolution de l'empreinte écologique de l'Afrique [Réf. 3]



La figure suivante, quant à elle, représente la répartition des pays en fonction de leur niveau de développement (représenté par l'IDH ¹) et de leur empreinte écologique. Le développement durable se situe dans la zone inférieure droite du graphique c'est-à-dire à un niveau de développement élevé et une empreinte écologique faible. Cette illustration met en évidence le fait que non seulement aucun pays ne se situe dans cette zone mais surtout qu'en suivant la voie « classique² » du développement, on passe systématiquement à côté du développement durable.

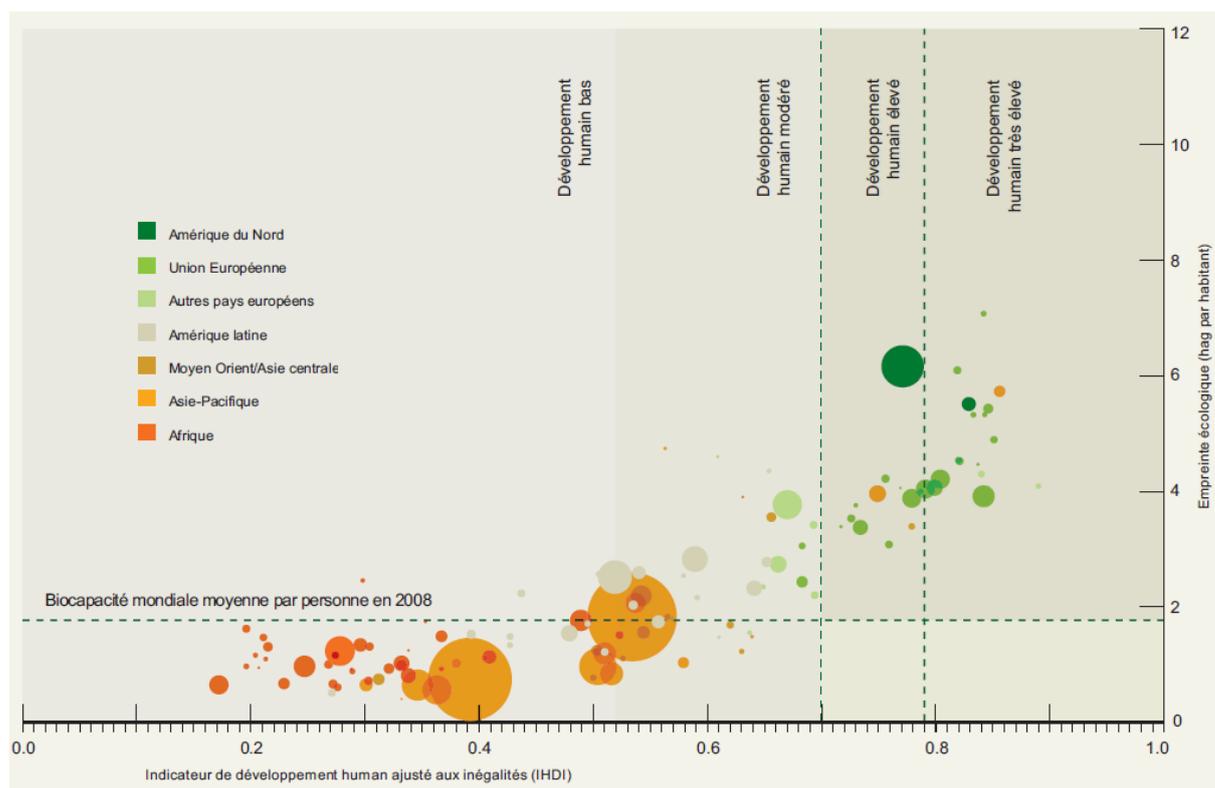


Figure 2 : Empreinte écologique de chaque pays en 2008 comparé à l'Indice de développement humain ajusté aux inégalités en 2011 [Réf. 3]

La stratégie à adopter pour atteindre le développement durable doit donc être différente pour les pays du sud et pour les pays du nord. Les pays développés se doivent de réduire leurs émissions de GES tout en conservant leur niveau de vie (ce qui correspond à une translation verticale vers le bas des points verts sur le graphique). En ce qui concerne les PVD, l'enjeu est

¹ Indice de Développement Humain

² On entend par « voie classique du développement », celle des pays industrialisés, celle qui privilégie l'économie et la production en consommant les ressources disponibles sans tenir compte de leur épuisement.

tout autre. Ils doivent parvenir à se développer et à augmenter le niveau de vie tout en maintenant leurs impacts environnementaux à un niveau acceptable (ainsi les points oranges feront une translation horizontale vers la droite sur le graphique).

La production d'énergie par biométhanisation permet tout à fait d'atteindre les objectifs du développement durable pour les pays d'Afrique. Pour ceux-ci, le biogaz ne représente pas une énergie de substitution à des énergies polluantes mais offre tout simplement un accès à l'énergie aux populations rurales (et potentiellement aux populations urbaines). Le biogaz est un moyen direct d'augmenter le niveau de vie des populations les plus pauvres et d'éradiquer l'extrême pauvreté tout en évitant une augmentation des émissions de GES et un épuisement des ressources (notamment le bois).

C'est dans ce contexte qu'un Programme National des Biodigesteurs a été créé au Burkina Faso, le PNB-Bf. Dans l'analyse qu'ils ont réalisée, ils promeuvent la construction de digesteurs enterrés simples et robustes afin d'offrir un accès bon marché au biogaz pour la population du pays.

De son côté, le Centre Écologique Albert Schweitzer du Burkina Faso (CEAS Burkina) travaille sur le développement de petites unités de biométhanisation afin d'offrir une alternative aux digesteurs de grandes tailles proposés par le PNB-Bf. Dans le cadre de ce projet, un partenariat avec HELMo-Gramme de Liège s'est créé. Ainsi des unités pilotes ont été et sont toujours réalisées et expérimentées tant au CEAS Burkina qu'à HELMo-Gramme.

Ce travail de fin d'études s'inscrit complètement dans la continuité de celui réalisé l'an passé par Nicolas Zimmermann. C'est pourquoi, il débute par une remise en contexte et une synthèse de ce qui a déjà été fait.

Pour éviter les redites, les principes théoriques et les généralités sur la biométhanisation ne seront pas nécessairement réexposés dans le présent travail mais seront reliés à la bibliographie de circonstance. Par contre, une approche de l'intégration de la méthanisation s'attardera sur le cas particulier des digesteurs domestiques à caractère rural et plus spécialement dans le contexte des PVD.

Il ne nous faudra pas oublier le lien historique avec la clinique du docteur Kaboré, car c'est grâce à un projet issu de la cellule Sud-Nord de HELMo-Gramme que tout a démarré. L'utilisation de biogaz était l'une des solutions potentielles envisagée dans le but d'atteindre



l'indépendance énergétique de la nouvelle clinique construite par le docteur Kaboré. C'est ainsi qu'une réflexion ou une re-réflexion s'est induite pour cerner le débat de l'utilisation de l'énergie dans ce contexte.

Cette partie sera naturellement suivie par une présentation du PNB-Bf ainsi qu'une description de leur type de digesteur. Leurs travaux ont en effet été d'une aide précieuse pour la suite du projet au sein du CEAS Burkina. De plus, il est indispensable que ces derniers développent une technologie différente à celle existante.

Enfin, les travaux réalisés lors du stage seront présentés, à savoir l'amélioration des digesteurs, la conception d'un système de stockage et l'ensemble des expérimentations. Cette partie sera suivie d'un comparatif de diverses technologies de biodigesteurs domestiques et pour conclure, des pistes d'améliorations seront proposées.



2. CONTEXTE DU PROJET

Avant toute chose, il est indispensable de resituer le présent projet dans son contexte. Pour ce faire, nous commencerons par analyser la situation du Burkina Faso ainsi que les mesures mises en place pour favoriser l'émergence des énergies renouvelables. Ensuite, nous poursuivrons par une présentation du CEAS Burkina et du projet dans lequel s'inscrit le développement des biodigesteurs pour finalement arriver à une synthèse de ce qui a été fait l'an passé.

2.1. LA SITUATION DU BURKINA FASO

Le Burkina Faso est un pays d'Afrique de l'ouest. Enclavé par ses 6 pays limitrophes, il ne possède aucune zone côtière. Sa superficie totale est de 274 400 km² pour une population de 20 millions d'habitants (en juillet 2017). La densité de population est donc de 73 habitants par km² (soit 5 fois moins que la Belgique).



Figure 3 : Situation géographique du Burkina Faso [réf. 25]

2.1.1. Climat et environnement

Le climat du pays varie en fonction de la latitude. On distingue donc trois zones climatiques. Le nord du pays se trouve dans la zone sahélienne qui est la plus chaude et la plus sèche. Son climat est caractérisé par une pluviométrie inférieure à 600 mm d'eau par an et des températures qui varient entre 15 et 45°C. Le sud du pays est en zone soudano-guinéenne. Les précipitations sont supérieures à 900 mm et les moyennes de température sont moins élevées. Entre ces deux zones, les conditions climatiques sont intermédiaires en termes de précipitations et de températures. Il y a deux grandes saisons au Burkina : la saison des pluies de juin à septembre et la saison sèche le reste de l'année.

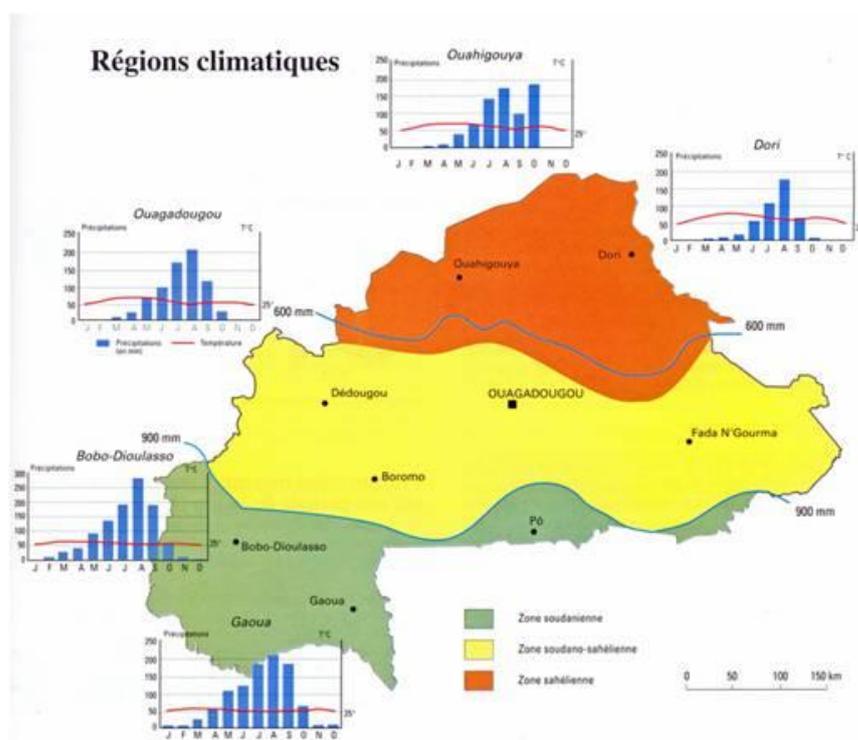


Figure 4 : Zones climatiques du Burkina Faso et profil de précipitation de certaines villes³

La mauvaise répartition des précipitations dans le temps (saisons) et dans l'espace (zones climatiques) crée des conditions de culture particulièrement difficiles surtout dans le nord du pays. En outre, le déboisement dû à la consommation de bois pour la cuisson, ce qui correspond tout à fait à la problématique à laquelle tente de répondre ce travail, participe à

³ Source : <https://bernardauburkina.wordpress.com/2011/04/19/histoires-dhier-et-daujourd'hui/>

la progression du désert dans la zone sahélienne. Tout cela entraîne des migrations de populations de plus en plus importantes du nord vers les zones du centre et du sud.

2.1.2. Niveau de développement⁴

Le Burkina Faso fait partie des 25 pays les plus pauvres du monde. Depuis son indépendance en 1960, le pays a cependant fait des progrès considérables en matière de développement. Le pourcentage d'enfants inscrits à l'école primaire est passé de 12,2% en 1971 à près de 88% en 2015. L'espérance de vie à la naissance quant à elle est passée de 34 ans en 1960 à presque 60 en 2015. Sur la même période, le Revenu National Brut (RNB) par habitant a été multiplié par 8.

Le Burkina Faso n'a pas fait exception à la règle qui lie le développement et les impacts environnementaux. Les deux figures que nous avons réalisées et présentées ci-dessous mettent en vis-à-vis l'évolution du PIB par habitant et l'évolution des émissions de CO₂ par habitant au cours des 50 dernières années. Nous sommes forcés de constater que les progrès économiques du pays sont majoritairement dus à un recours aux énergies fossiles entraînant l'augmentation de la production de CO₂ ce que la similitude des deux graphiques explique.

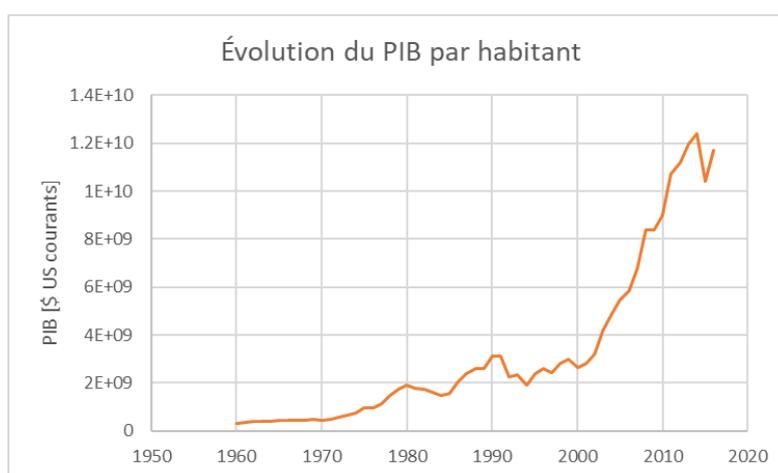


Figure 5 : Évolution du PIB par habitant au Burkina

⁴ Les statistiques détaillées dans ce paragraphe sont issues des données du Groupe de la Banque Mondiale [réf. 11]

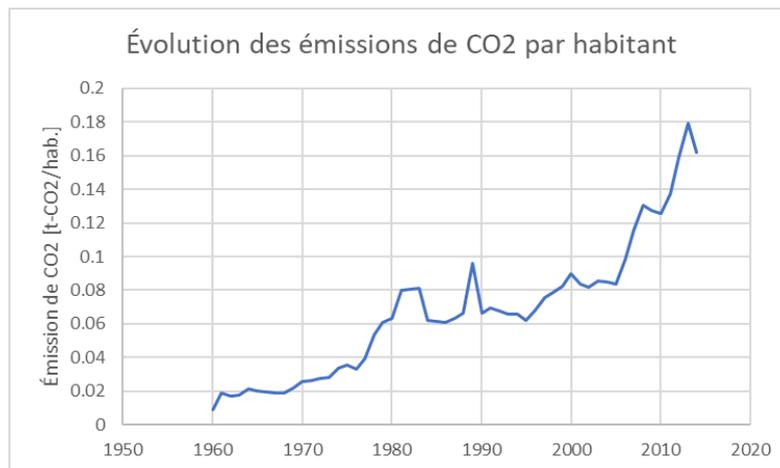


Figure 6 : Évolution des émissions de CO₂ par habitant au Burkina

Malgré les progrès considérables du pays, plus de 40% de la population vit toujours sous le seuil de pauvreté national. En 2015, l'IDH du pays est de 0,402, ce qui le classe en 185^{ème} position sur 188 pays classés⁵. Il est donc indispensable que le développement du pays se poursuive mais il est également crucial de réduire au maximum le recours aux énergies fossiles.

2.1.3. Disparités entre le milieu rural et urbain

En 2016, seul 30% de la population vit dans les villes⁶. La majorité de la population burkinabé est donc rurale. L'agriculture occupe 80% de la population active mais ne représente que 32% du PIB. Ce sont ces populations qui sont les plus pauvres. En milieu rural, on enregistre un taux de pauvreté de 47,5% contre 13,7% en milieu urbain⁷.

La plupart des infrastructures et des services étant concentrés dans les villes, les populations rurales ont donc un moins bon accès aux soins de santé, à l'éducation et à l'énergie. Par exemple, le taux d'électrification est de 50% en milieu urbain contre seulement 4% en milieu rural.

Nous constaterons par la suite que le biogaz, de par les besoins de ces procédés de production, s'inscrit bien dans un cadre de développement du milieu rural.

⁵ Source : Programme des Nations Unies pour le Développement, Rapport Mondiaux sur le développement humain.

⁶ Source : <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/BFA/fr/SP.URB.TOTL.IN.ZS.html>

⁷ Source : Institut National de la statistique et de la démographie (<http://www.insd.bf/n/>)

2.1.4. Approvisionnement énergétique⁸

Les besoins énergétiques des populations rurales servent principalement pour la cuisine et pour l'éclairage. La répartition des sources d'énergies utilisées pour l'éclairage par l'ensemble de la population du Burkina Faso est représentée sur la figure suivante.

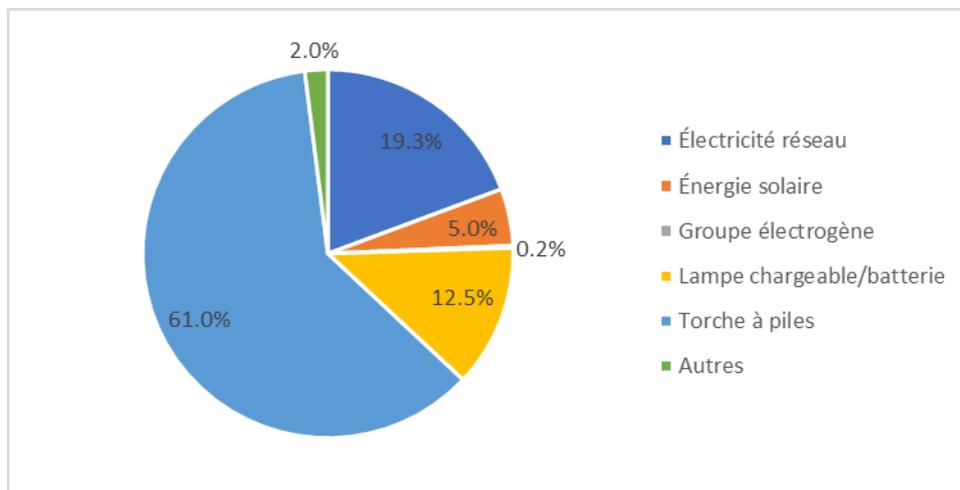


Figure 7 : Répartition des sources d'énergies utilisées pour l'éclairage

Nous constatons que la majeure partie de l'éclairage provient de sources électriques. Or, comme mentionné au point précédent (2.1.3), la grande majorité des zones rurales ne sont pas desservies en électricité. La figure montre également que 5% des besoins en éclairage sont assurés par des panneaux photovoltaïques (PV). Les installations de PV ont connu un grand essor au Burkina grâce notamment aux mesures mises en place par le gouvernement (voir 2.1.5).

En ce qui concerne la cuisine, la principale source d'énergie est le bois de chauffe (voir Figure 8). En effet, la plupart des burkinabé, n'ayant pas les moyens financiers ou n'ayant tout simplement pas accès à d'autres sources d'énergie, récoltent du bois à proximité de leur habitation pour cuisiner. Avec la croissance démographique qu'a connue le pays, cette pratique participe aujourd'hui activement à la déforestation et à la progression du désert dans le nord du pays.

⁸ Source : Institut National de la statistique et de la démographie (<http://www.insd.bf/n/>)

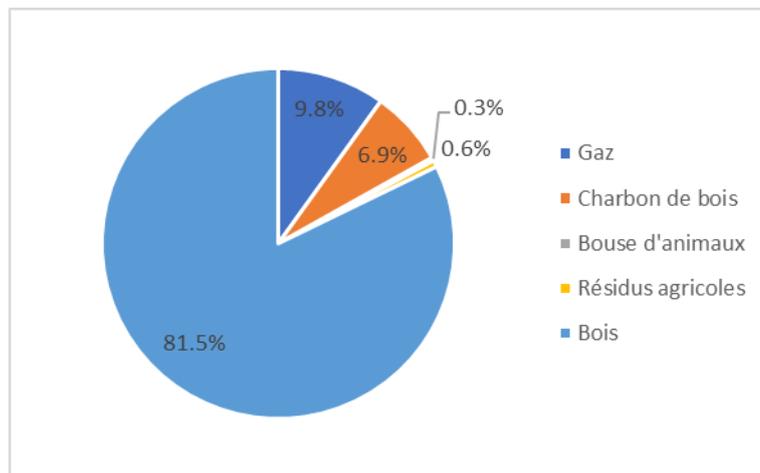


Figure 8 : Répartition des sources d'énergie pour la cuisine au Burkina en 2014

En 2014, le bois représente 81,5% de l'énergie de cuisson. Il est à noter qu'en 2003 cette proportion s'élevait à 91%. L'État et les associations actives au Burkina sont conscients du problème et tentent de mettre en place des mesures pour y remédier. Parmi celles-ci, on peut notamment citer la sensibilisation de la population et la mise en place de mesures pour faciliter l'accès à d'autres sources d'énergie comme le gaz par exemple.

Sur le graphique, nous observons également que 0,3% des besoins sont assurés par de la bouse d'animaux conduisant à l'élaboration de biogaz. Les statistiques de 2014 sont les premières qui font apparaître le biogaz comme source d'énergie pour la cuisson. Cette apparition est due à la mise en place par l'Etat d'un programme national afin de permettre le développement de digesteurs domestiques partout dans le pays.

2.1.5. Politiques énergétiques du Burkina Faso

Le premier grand pas vers les énergies renouvelables au Burkina Faso a eu lieu en 2008. Avec l'aide (entre autres) de l'ONG hollandaise SNV⁹ la création d'un programme national pour le développement et la promotion des digesteurs domestiques a débuté. Par manque d'intérêt de la part du ministère de l'énergie et du ministère de l'agriculture, c'est le ministère de l'élevage qui a pris sous son aile le projet de SNV. Celui-ci a abouti à la création du Programme National des Biodigesteurs (pour plus de détails, voir le chapitre 5).

⁹ Stichting Nederlandse Vrijwilligers (fondation des volontaires néerlandais) est une organisation néerlandaise pour le développement surtout active dans les PVD

Les premières mesures politiques favorisant le développement des énergies renouvelables seront mises en place par le gouvernement précédent. En 2013, l'État supprime les taxes à l'importation sur l'ensemble du matériel photovoltaïque, ce qui a permis une baisse des prix de 30 à 40%¹⁰. Les prémices de la création de l'Agence Nationale des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (ANEREE) ont également été mises en place à ce moment-là. Il faudra cependant attendre la législature actuelle pour voir apparaître de véritables changements politiques visant à promouvoir les énergies renouvelables.

C'est en 2015 que le nouveau gouvernement prend place. Il effectue une réforme du ministère de l'énergie, des mines et des carrières en créant un ministère spécifique à l'énergie. Celui-ci reprend trois directions générales, celle des énergies conventionnelles, celle des énergies renouvelables et celle pour l'efficacité énergétique.

Ensuite, un vaste Plan National de Développement Economique et Social (le PNDES) voit le jour. Celui-ci s'inscrit dans le cadre des politiques énergétiques de la CEDEAO¹¹. Ce plan comprend notamment l'installation de PV dans l'ensemble des bâtiments des ministères ainsi que dans les centres de santé et de promotion sociale¹². Il prévoit également le remplacement de l'éclairage public et de l'éclairage des bâtiments des ministères par des lampes LED.

En octobre 2016, l'ANEREE voit enfin le jour. Celle-ci va jouer un rôle de terrain en tant que structure technique dans la mise en place du PNDES. Elle est responsable de la sensibilisation, de la promotion, de l'implémentation du plan au niveau des communes, des formations, des certifications, des contrôles qualités, de la gestion des centrales et mini centrales solaires, etc.

En avril 2017, une nouvelle loi sur l'énergie est votée. Cette loi autorise les particuliers à réinjecter sur le réseau et à revendre à la SONABEL¹³ leur surplus de production électrique ce qui met fin au monopole de production d'électricité de cette société d'État. Elle comprend également la création d'une Agence Burkinabè pour l'Electrification Rurale (ABER). Cette dernière va s'occuper de l'installation de minicentrales PV *offgrid* afin d'offrir un accès à

¹⁰ Selon une étude réalisée par le CEAS Burkina

¹¹ La CEDEAO (Communauté Economique Des Etats d'Afrique de l'Ouest) a notamment émis deux politiques : la PERC (Politique des Energies Renouvelables de la CEDEAO) et la PEEC (Politique de l'Efficacité Energétique de la CEDEAO).

¹² Cela reprend principalement les hôpitaux et les écoles.

¹³ Société Nationale Burkinabè de l'Électricité



l'électricité dans les villages. Enfin, un décret se basant sur cette même loi oblige les entreprises à faire un audit énergétique chaque année.

Dans le futur, l'État projette également la construction de 7 centrales hydroélectriques. Le lancement de ces vastes plans énergétiques a fait entrer le Burkina Faso de plein pied dans sa transition énergétique.

2.2. PRÉSENTATION DU CEAS BURKINA

2.2.1. Historique

Le Centre Écologique Albert Schweitzer est une ONG suisse qui a vu le jour en 1980. Son but est de lutter contre la pauvreté et de favoriser le développement de l'Afrique tout en respectant l'environnement. La démarche s'inscrit parfaitement dans le cadre du développement durable avec comme slogan « Innovons pour une Afrique verte, sociale et prospère ! ».



Très vite après sa création, le CEAS lança deux antennes africaines au Burkina et à Madagascar. Plus tard, une troisième filiale au Sénégal sera mise en place. C'est en 1982 que débutent les activités du CEAS Burkina. Celui-ci est alors entièrement dépendant de l'ONG suisse.

En 2009, le CEAS Burkina devient une structure locale indépendante et prend donc le statut de société de droit burkinabé. À partir de là, l'ONG est libre de ses actions mais conserve toujours des partenariats techniques et financiers avec le CEAS suisse.

2.2.2. Secteurs d'activités

La mission du CEAS Burkina est clairement définie. Son but est de « Contribuer au développement durable de l'Afrique d'une manière générale et du Burkina Faso en particulier, à travers : La lutte contre la pauvreté et la protection et la gestion de l'environnement »¹⁴.

¹⁴ Source : Réf. 6.

Pour mener à bien ces objectifs, le CEAS Burkina œuvre dans cinq grands secteurs d'activités à savoir la gestion de l'eau et l'assainissement des déchets, la transformation agroalimentaire, l'agriculture durable, les technologies appropriées et les énergies renouvelables. Ces domaines sont gérés par deux départements : le DESA (Département Environnement et Sécurité Alimentaire) et le DRAI (Département Recherche Action et Innovation).

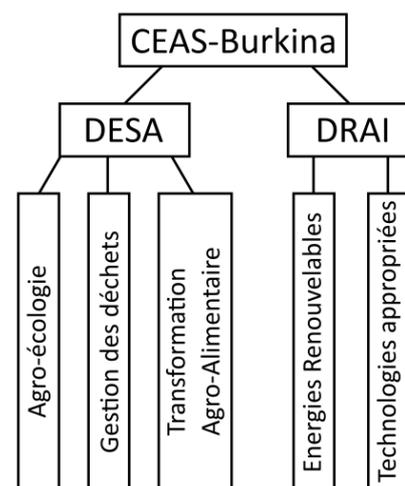


Figure 9 : Organisation des secteurs d'activités

La stratégie d'intervention du CEAS Burkina commence tout d'abord par de la recherche appliquée. Ensuite, un

transfert de compétences est effectué via des formations et des sensibilisations. Finalement, les projets sont suivis, encadrés et soutenus lors de leur mise en place sur le terrain.

Le CEAS Burkina compte à son actif la réalisation de nombreux équipements appelés « technologies appropriées » qui participent au développement des populations rurales. Parmi celles-ci, il est notamment permis de citer des séchoirs alimentaires, des décortiqueuses, des broyeurs, des presses ou encore des unités de fabrication de pavés en plastiques recyclés.

Dès 2005, le CEAS Burkina a élargi son secteur d'activité aux énergies renouvelables. Comme déjà mentionné précédemment, l'accès à l'électricité pose un réel problème pour les populations rurales. Le CEAS a donc participé à de nombreux projets d'installations solaires dans les villages. Le DRAI a également développé un certain nombre d'équipements sur base de la technologie PV comme des motopompes solaires et des réfrigérateurs solaires.

2.2.3. Le projet Energy for Life Burkina

Pour faire face au gros problème d'accès à l'énergie des population rurales, le CEAS Burkina a mis sur pied le projet Energy for Life. Ce projet est financé par le CEAS Suisse et est mené en étroite collaboration avec les autorités de 6 communes rurales. Le but est d'offrir un accès à l'énergie électrique et thermique à l'ensemble de ces communes.

C'est dans le cadre de ce projet que s'inscrit le développement des digesteurs domestiques. En effet, comme dans l'ensemble des zones rurales du pays, les habitants de ces communes cuisinent principalement au bois. Or, l'utilisation de ce combustible, en plus de conduire au

déboisement, engendre des problèmes de santé chez les personnes exposées quotidiennement aux fumées.

Par ces travaux de recherche, le CEAS Burkina espère offrir un accès à la technologie des biodigesteurs domestiques pour les populations rurales. Le système développé se doit d'être simple d'utilisation, robuste, flexible et par-dessus tout bon marché.

2.3. LE LIEN HISTORIQUE

Le présent projet a vu le jour grâce à la cellule Sud-Nord de HELMo. L'objectif de celle-ci est de développer des projets techniques mais également socio-culturels au sud en collaboration avec des partenaires locaux. C'est dans ce cadre que des collègues de HELMo-St-Julienne ont rencontré le docteur Bertrand Kaboré.

Le projet de ce gynécologue burkinabé était de construire un grand dispensaire. Il a également prévu la construction de logements à proximité dans le but de pouvoir accueillir des étudiants en paramédicale (de HELMo-St-Julienne entre autres) en stage dans sa nouvelle clinique. C'est au travers de ce projet que la collaboration a commencé.

Au début du partenariat, la construction du premier service de la clinique venait tout juste de démarrer. Une réflexion est alors apparue du côté de HELMo-Gramme quant à l'approvisionnement énergétique du bâtiment. À cette époque, le biogaz était une des technologies étudiées à l'institut et celle-ci pouvait être envisagée à cet effet. Des membres de la cellule Sud-Nord faisant partie de HELMo-Gramme, avec l'aide de M. Kaboré, ont alors commencé à prospecter et à établir le contact avec des partenaires techniques potentiels sur place pour le développement d'une unité de biométhanisation.

C'est lors de ces recherches qu'a eu lieu la rencontre avec le CEAS Burkina. Cette structure convenait parfaitement pour l'accueil d'étudiant stagiaire et possédait les moyens techniques pour mener à bien ce projet. De plus, l'entreprise venait justement de commencer des recherches et la création d'un premier prototype de biodigesteur dans le cadre du projet Energy For Life mentionné précédemment.

L'objectif premier du projet de biogaz au Burkina Faso était donc d'assurer l'indépendance énergétique de la clinique du docteur Kaboré tout en restant une possibilité parmi d'autres.

2.4. RÉSUMÉ DU PRÉCÉDENT TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES

La collaboration entre HELMo-Gramme et le CEAS Burkina a vu le jour l'année dernière au travers du projet de réalisation d'une unité de biométhanisation. Nicolas Zimmermann, dans le cadre de son stage et de son travail de fin d'études, a contribué à la première phase du projet. Au terme de celle-ci, il a rédigé son mémoire intitulé « *Contribution au développement d'une installation de biométhanisation adaptée à l'utilisation rurale au Burkina Faso* ».

La première phase du projet consistait à concevoir une unité pilote de biodigesteur de surface à caractère rural. Ainsi, l'idée du CEAS Burkina était de se servir de barriques métalliques de 200 litres pour fabriquer le digesteur car celles-ci sont abondantes et relativement bon marché en Afrique. Un premier prototype non fonctionnel avait été réalisé alors.

Avec l'aide de Nicolas Zimmermann, plusieurs améliorations ont été apportées à cette première barrique. Le système d'alimentation a été entièrement revu afin de rendre l'insertion du substrat plus aisée tout en évitant l'entrée d'oxygène (inhibitrice pour le processus). Une fois modifié, ce digesteur semi-continu a pu être testé et les résultats furent concluants. À ce stade, l'unité était non seulement fonctionnelle mais produisait du gaz de très bonne qualité avec un taux de méthane aux alentours de 60%.

Pour aller plus loin, la construction d'une unité plus importante a été entreprise. Cette fois, ce sont 5 barriques qui furent assemblées afin d'augmenter le volume du digesteur pour répondre aux besoins de production (voir Figure 10). Ce nouveau digesteur, bien que de configuration légèrement différente, est basé sur le même principe de fonctionnement que le premier. Celui-ci n'a pu être testé par Nicolas Zimmermann mais les membres du CEAS Burkina l'ont expérimenté après son départ. Les premiers résultats ont permis de constater une défaillance. Ce deuxième digesteur présentait des problèmes d'étanchéité. Ceux-ci ont été résolus et les résultats suivants furent par la suite à la hauteur des attentes.



Figure 10 : Digesteur à 5 fûts réalisé l'an passé au CEAS-Burkina

Dans son mémoire, Nicolas Zimmermann propose également un système de stockage qui n'a pas été réalisé à l'époque (voir Figure 11). Lors des expérimentations, le gaz était simplement stocké dans des chambres à air. Or, le stockage s'annonce comme un point essentiel pour l'utilisation de cette technologie.

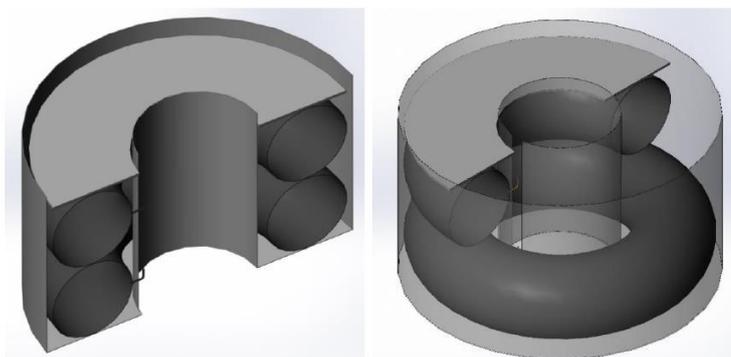


Figure 11 : Système de stockage proposé l'an passé par Nicolas Zimmermann

Cette première phase de développement du biodigesteur a permis des avancées majeures avec notamment la réalisation de 2 systèmes fonctionnels et une proposition pour le stockage. Par contre, aucune mesure n'a été réalisée afin de quantifier la production effective de gaz. Une étude plus détaillée des performances des digesteurs devra donc faire partie de la deuxième phase.

De plus, il reste quelques améliorations à apporter aux prototypes afin qu'un usage domestique puisse réellement en être fait en toute aisance. Pour ce faire et pour que la poursuite du développement soit adaptée au contexte rural des PVD, il apparaît indispensable de revenir sur certains aspects du biogaz à caractère rural.

3. INTÉGRATION DE LA BIOMÉTHANISATION DOMESTIQUE EN MILIEU RURAL

Dans son travail, Nicolas Zimmermann s'est attardé sur une approche détaillée de la biométhanisation en général. Pour les lecteurs non-avertis, il est conseillé de prendre connaissance de cette partie du précédent travail afin de mieux comprendre la suite. Ici, c'est une approche détaillée plus spécifique à l'intégration des biodigesteurs domestiques dans le contexte des PVD qui est proposée. Celle-ci se concentre surtout sur certains aspects théoriques qu'il est indispensable de prendre en compte pour développer un biodigesteur domestique efficace, bien adapté et souple d'utilisation.

3.1. LE BIOGAZ DOMESTIQUE ET LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Pour commencer, il est indispensable de comprendre les intérêts et les enjeux du biogaz domestique pour les PVD. En milieu rural, l'installation d'un biodigesteur domestique apporte bien plus aux populations qu'une simple source d'énergie verte. Il permet également de préserver leur milieu, d'améliorer leur condition de vie et participe activement aux économies locales. Les paragraphes suivants passent en revue l'ensemble des avantages qu'offrent les biodigesteurs domestiques.

Bien entendu, nous ne négligeons pas les dangers potentiels liés à son utilisation.

3.1.1. Aspects environnementaux

3.1.1.1. *Énergie propre*

Le développement du biogaz permet au Burkina la production d'un combustible renouvelable. Cette source d'énergie est une aubaine pour compléter leur transition énergétique. Contrairement à l'électricité, l'énergie thermique pour la cuisson est consommée par l'ensemble de la population. Le biogaz va permettre de rendre celle-ci « verte ».

3.1.1.2. *Alternative au déboisement*

L'utilisation massive de bois pour la cuisine est la première cause de déboisement au Burkina comme en Afrique en général. Le biogaz offre l'accès à une nouvelle source d'énergie pour les populations rurales. La généralisation des biodigesteurs dans les campagnes permettrait de



mettre fin à la déforestation, ou en tout cas de la ralentir fortement, et de préserver ainsi les écosystèmes.

3.1.1.3. *Solution pour la gestion des déchets*

En milieu rural, le biogaz va permettre une valorisation des déchets organiques des ménages ainsi que des déjections animales. Jusqu'à présent, ceux-ci ne sont pas forcément compostés et représentent alors une perte d'engrais pour les agriculteurs.

En ville, les déchets organiques se retrouvent dans les poubelles et représentent plus de 50% en poids de celles-ci. Des projets de digesteurs domestiques en milieu urbain permettraient également de réduire considérablement le volume des ordures ménagères.

3.1.2. Aspects sociaux

3.1.2.1. *Amélioration de la condition de la femme*

La collecte du bois est extrêmement pénible et chronophage. Ce sont généralement les femmes qui s'acquittent de cette tâche. De plus, avec le déboisement, les distances parcourues deviennent de plus en plus longues. L'acquisition d'un digesteur domestique soulage les femmes d'une lourde corvée et leur permet d'avoir plus de temps. La cuisson au gaz permet également d'avoir une meilleure flamme et facilite donc la cuisine.

3.1.2.2. *Progrès sanitaires*

Le biodigesteur domestique permet deux améliorations significatives d'un point de vue sanitaire. Tout d'abord, il offre aussi la possibilité éventuelle de raccorder une toilette directement sur le digesteur. Celle-ci offre une meilleure hygiène que les latrines (s'il y en a) et évite une contamination des eaux de surface lors de la saison des pluies.

Deuxièmement, la combustion du gaz produit beaucoup moins de fumées que celle du bois. Actuellement, l'utilisation de bois de chauffe est responsable de 2 millions de décès chaque année à travers le monde causés par la suie et la fumée¹⁵. Une étude menée en Indonésie a démontré que l'utilisation du biogaz pour la cuisine réduit les irritations des yeux de 22%, les infections oculaires de 10%, la toux de 21% et les difficultés respiratoires de 21%¹⁶. La cuisson

¹⁵ Source : réf XX. (Utilisation de l'effluent)

¹⁶ Mucharam, I.S., Pariatmoko & de Groot, *Turn waste into benefit: Credit access to diary farmers in east Java, Indonesia for Biogas Units*, Nestlé Indonesia & Hivos, cas d'étude, 2012.



au biogaz participe donc activement à l'amélioration de la santé des femmes et des enfants présents dans la cuisine.

3.1.2.3. Moyen pour lutter contre la famine

Le digestat produit lors de la biométhanisation est soit directement versé sur les champs soit composté avec d'autres matières organiques avant d'être épandu sur les terres de cultures. Cette production d'engrais permet d'améliorer considérablement les rendements agricoles et donc les conditions de vie des paysans. De plus, une plus grande production alimentaire peut potentiellement aider à lutter contre la famine.

3.1.2.4. Accès à l'éclairage

En plus d'être employé pour la cuisson, le biogaz peut être utilisé dans des lampes à gaz. Par ce biais, les populations qui n'ont pas accès à l'électricité auront un moyen de s'éclairer. L'accès à l'éclairage dans les villages permet un développement social important et offre notamment la possibilité aux enfants de réviser leurs leçons une fois la nuit tombée.

3.1.3. Aspects économiques

3.1.3.1. Énergie plus accessible

Le biogaz domestique permet aux familles d'être autonomes en énergie. Pour celles qui achètent du gaz ou du charbon de bois, cela représente une économie substantielle. De plus, le biogaz représente la solution la moins onéreuse pour la production d'une énergie propre à l'échelle domestique.

3.1.3.2. Production d'engrais

Les engrais sont une denrée précieuse en Afrique et les engrais chimiques sont particulièrement onéreux. La production d'un engrais de qualité par le biais d'un digesteur domestique permet des économies considérables pour les agriculteurs. Certaines fois un surplus de d'effluent est disponible. Celui-ci peut facilement être revendu à d'autres agriculteurs, ce qui offre un revenu supplémentaire à la famille.

3.1.3.3. Création d'emplois

La construction des digesteurs domestiques nécessite un personnel qualifié et spécialement formé à cet effet. Que ce soit des digesteurs en maçonnerie enterrés ou des digesteurs



métalliques en surface, le niveau d'étanchéité requis nécessite d'importants savoir-faire. La construction et la vente de digesteurs domestiques constituent donc un nouveau secteur économique dont le développement s'accompagnera de la création de nombreux emplois.

À la vue de tout ce qu'il offre, on peut dire que le biogaz domestique s'inscrit parfaitement dans le développement durable. Il permet non seulement des progrès environnementaux mais également des progrès socio-économiques.

3.2. RAPPELS GÉNÉRAUX SUR LA MÉTHANISATION¹⁷

Dans la nature, tout est cyclique. Notre planète est un système fermé : il n'y a ni entrée ni sortie de matières. Ainsi, grâce aux cycles biologiques, l'ensemble de la matière est perpétuellement transformée et recyclée. Lors de la fin de vie d'un être vivant (animal ou végétal), la matière organique qui le compose se doit d'être décomposée afin de « retourner à la terre » et servir de base à de nouvelles chaînes trophiques. La décomposition de la matière organique peut se faire par deux voies : par décomposition aérobie ou par digestion anaérobie.

Dans la nature, c'est la décomposition aérobie que l'on retrouve le plus fréquemment. Celle-ci a lieu partout : dans la litière d'une forêt, dans un tas de compost ou au sein de toutes matières mortes laissées à l'air libre. Cette décomposition nécessite une biocénose très diversifiée. Les différents organismes dont elle est constituée travaillent en symbiose afin de transformer la matière organique en éléments assimilables par les plantes. Ces transformations consomment de l'oxygène (puisqu'elles sont aérobies) et produisent du CO₂. Elles s'accompagnent également d'un dégagement de chaleur.

À côté de la voie « classique » de décomposition aérobie, on retrouve également dans la nature une digestion anaérobie. Aussi appelée méthanisation (ou biométhanisation), cette digestion a lieu lorsque de la matière organique morte se retrouve dans un milieu privé d'oxygène comme dans les marais, dans certains sols, dans les décharges ou encore dans les intestins de l'homme et des animaux par exemple. La digestion anaérobie s'accompagne

¹⁷ Ce chapitre est très succinct, pour plus de détails voir le TFE de Nicolas Zimmermann



d'une formation de méthane (CH_4) mais n'engendre pas de production de chaleur. Au contraire, elle nécessite de la chaleur pour que les bactéries puissent se développer.

La méthanisation est un processus en plusieurs étapes dont les 4 principales sont l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Chacune de ces étapes nécessite des bactéries spécifiques. Le développement de ces bactéries peut prendre un certain temps. C'est pourquoi, il est d'usage de procéder à une « inoculation » du digesteur avant son lancement. L'inoculation consiste à placer des bactéries méthanogènes dans le digesteur afin que le développement des populations bactériennes soit plus rapide. Elle peut par exemple se faire en conservant une partie du digestat dans le réacteur.

La flore bactérienne nécessaire à la méthanisation est fragile et ne peut survivre que dans certaines conditions de température, de pH, d'opacité, tout cela bien sûr en anaérobiose stricte uniquement. Il existe différents régimes de fonctionnement en fonction de la plage de température : le régime psychrophile, mésophile et thermophile. En Afrique, le climat permet le développement du régime mésophile avec des températures variant de 15 à 45°C.

Au terme de la méthanisation, le digestat obtenu peut être utilisé comme engrais naturel pour amender les cultures. Celui-ci permet une augmentation significative des rendements surtout dans les régions d'Afrique où les sols sont pauvres.

3.3. MODÈLES DE RÉACTEUR

En génie chimique, les réacteurs peuvent être classifiés en deux catégories suivant le modèle théorique selon lequel ils ont été conçus au niveau de l'hydrodynamique. On distingue, en effet, les réacteurs « cuves » des réacteurs « tubes ».

Le réacteur cuve est caractérisé par un volume compact c'est-à-dire que le rapport surface sur volume n'est pas très grand. L'ensemble du volume est considéré comme homogène (dit « parfaitement mélangé »). Les conditions réactionnelles sont donc les mêmes pour l'ensemble du volume.

Le réacteur tube est quant à lui caractérisé par un fonctionnement sur la longueur. Le mélange réactionnel se déplace à la manière d'un piston. Le milieu n'est donc pas homogène ce qui



entraîne que les conditions réactionnelles ne sont pas identiques en tous points de la longueur du réacteur.

Dans le cas de la biométhanisation, le modèle du réacteur tube n'est pas tout à fait approprié à ce type de réaction car la matière fraîche n'est pas mise complètement en contact avec la matière plus ancienne qui contient les microorganismes. Or, le processus de digestion anaérobie nécessite cette mise en contact afin que l'inoculation puisse être réalisée. Celle-ci est donc beaucoup plus lente dans la configuration d'un réacteur tube. Cela aura pour conséquence d'augmenter considérablement le temps de rétention hydraulique nécessaire (la cinétique globale est plus lente) et donc pour une même quantité de substrat traité le volume du réacteur sera plus important. C'est pourquoi, pour ce type de mise en œuvre réactionnelle, il est préférable de concevoir le biodigester selon le modèle de réacteur cuve.

3.4. RÉGIME DE FONCTIONNEMENT (CONTINU/BATCH)

Contrairement au réacteur tube, le réacteur cuve peut fonctionner en régime continu ou discontinu (aussi appelé « *batch* »). Depuis le début des recherches sur la réalisation d'une unité domestique, la question du choix du régime de fonctionnement est restée une inconnue potentielle. Le PNB-Bf a développé un réacteur qui peut être alimenté chaque jour (c'est-à-dire continu). Le CEAS Burkina a quant à lui expérimenté un système semi-continu qui pouvait être réalimenté tous les 30 voire tous les 10 jours. Ensuite, face aux problèmes d'étanchéité, ils ont été contraints à repasser à un système « *Batch* » c'est-à-dire totalement discontinu.

Le principal avantage d'un système *batch* est que l'étanchéité est plus facile à assurer. Dans le cas d'un système continu, lors de l'alimentation, il faut parvenir à insérer le substrat tout en évitant à tout prix l'entrée d'oxygène (ce qui n'est pas chose aisée). Par contre, dans un système fonctionnant en *batch*, le réacteur est rempli puis fermé hermétiquement à l'aide de moyens simples comme un bouchon ou un couvercle (dont on peut garantir l'étanchéité sans trop de difficultés). Le digesteur restera fermé jusqu'à la fin du processus de méthanisation puis sera vidé et à nouveau rempli.

Cependant, en marge de la difficulté pour assurer leur étanchéité, les systèmes continus présentent de nombreux avantages.



Premièrement, les animaux, jusqu'à preuve du contraire, font leurs besoins tous les jours. Les paysans éleveurs doivent donc collecter les lisiers quotidiennement même si l'alimentation ne se fait qu'au bout de quelques jours. Or, si les lisiers sont entreposés à l'air libre en attendant leur insertion, par conséquent leur potentiel méthanogène va diminuer. En effet, en présence d'oxygène la matière organique se décompose en produisant du CO₂ (contenant ainsi du carbone perdu pour la production de CH₄). Bien que cette diminution soit relativement faible¹⁸, l'idéal est tout de même d'insérer les lisiers dans le digesteur dès leur production par les animaux afin de maximiser la production de méthane.

Deuxièmement, la bouse de vache contient un ensemble de microorganismes anaérobies (provenant des estomacs de la vache) utiles à la méthanisation. En laissant ceux-ci en présence d'oxygène leurs populations décroissent rapidement. Ces organismes actifs sont surtout cruciaux lors du démarrage du biodigesteur car ils jouent le rôle d'inoculateurs¹⁹. Ainsi, la fraîcheur du fumier a un impact significatif sur le temps de démarrage du réacteur.

Enfin, la production globale est meilleure en continu car il n'y a pas d'interruption du processus. Le milieu réactionnel est stable et le substrat est inoculé dès son entrée dans le digesteur. De cette manière, la composition ainsi que la quantité de gaz produits sont constantes, ce qui en fait une source d'énergie fiable.

Dans le cas concret d'un usage rural, il est clair qu'une collecte et une alimentation quotidienne assureront une fraîcheur supérieure du substrat, ce qui permettra non seulement de maximiser la production et de minimiser le temps de séjour mais également d'avoir un fonctionnement constant du biodigesteur. Il est donc préférable de développer un digesteur fonctionnant en continu.

3.5. TAUX DE MATIÈRES SÈCHES

En voie humide, pour une bonne hydrolyse (qui est la phase la plus lente qui conditionne donc la vitesse de l'ensemble du processus), il faut un taux de matière sèche du substrat compris

¹⁸ Voir le point 4.4.2. Impact de la fraîcheur des fumiers dans le TFE de Nicolas Zimmermann [Réf. 25].

¹⁹ C'est pourquoi il est conseillé de démarrer un biodigesteur avec de la bouse de vache même si par la suite on passe à un autre substrat.



entre 8 et 10%. Pour ajuster ce taux, les lisiers sont généralement mélangés à une certaine quantité d'eau.

Dans la grande majorité de la littérature qui traite du biogaz, il est conseillé de réaliser un mélange en quantité pondérale égale d'eau et de bouse de vache, soit un rapport de 1 kg sur 1 kg. Or, le taux de matière sèche de la bouse de vache est très variable en fonction de leur alimentation, de l'espèce, de la région du monde etc. Fort de cette connaissance, il paraît évident que le « rapport universel » pondéral de 1 sur 1 se doit d'être remis en question.

En effet, il est nécessaire d'adapter la quantité d'eau ajoutée en fonction du taux de matière sèche de la bouse de vache utilisée. En Europe par exemple, les vaches laitières (de race Holstein) principalement nourries par ensilage font des bouses très liquides. Il ne sera donc pas nécessaire d'ajouter beaucoup d'eau puisque le taux de matières sèches est déjà relativement faible. À l'opposé, dans certaines régions particulièrement sèches de l'Afrique, les excréments des vaches sont solides et très compacts. Ils ne contiennent que très peu d'eau. Dans ce cas, le taux de matières sèches est tel qu'il est parfois nécessaire de mélanger 4 volumes d'eau à un volume de bouse.

Idéalement, dans une démarche rigoureusement scientifique, la quantité d'eau à ajouter doit être calculée sur base du taux de matières sèches de la bouse utilisée. Celui-ci peut être déterminé par des méthodes assez simples comme celles décrites au point 4.2.2. « Caractérisation de la matière première » dans le TFE de Éric Ngoga [Réf. 14]. Sur base de cette donnée, la dilution peut être ajustée afin que le taux de matières sèches du substrat final soit comprise entre 8 et 10% comme prescrit.

3.6. TEMPS DE RÉTENTION HYDRAULIQUE

Le temps de rétention hydraulique (HRT) représente le temps que le substrat passe dans le digesteur. Il dépend de nombreux paramètres (notamment la température, la nature du substrat, la qualité du substrat, ...). Il faut s'assurer qu'il soit suffisamment long sans quoi les populations de microorganismes sont évacuées trop rapidement et n'ont pas le temps de se développer de sorte que le substrat ne sera pas correctement digéré.



Pour un système batch, le HRT correspond au temps de séjour du substrat dans le digesteur. Dans le cas d'un digesteur continu, le HRT est défini comme le volume (V) de digesteur divisé par le débit volumique journalier de substrat (Q).

$$HRT = V/Q$$

Equation 1 : définition du HRT en Système Ouvert et Stationnaire

En connaissant le HRT, il est alors possible de déterminer la quantité de substrat à introduire quotidiennement en fonction du volume du digesteur. Dans le cas d'une fermentation en régime mésophile de lisiers, les temps de rétention hydraulique suivants sont préconisés²⁰ :

Type de substrat	HRT prescrit (en jours)
Lisier bovin	20-30
Lisier porcin	15-25
Lisier de volaille	20-40
Mélange de lisiers et de déchets végétaux	50-80

Table 1 : Temps de rétention hydraulique prescrits pour différents lisiers en régime mésophile

Dans la pratique, ce n'est pas tellement le temps de rétention hydraulique qui importe mais le temps de rétention solide (SRT). Dans le cas des modèles théoriques (réacteur tube et réacteur cuve parfaitement mélangé) le SRT et le HRT sont égaux.

Dans la pratique qui nous concerne, les réacteurs cuves ne sont pas parfaitement mélangés. Des analyses d'échantillons de digestat pris à différentes hauteurs dans un digesteur à dôme fixe ont démontré que la matière organique se retrouve principalement dans le fond du digesteur. En retenant celle-ci et en évacuant les phases supérieures (principalement aqueuses), il est possible d'augmenter le rapport SRT/HRT. Le SRT étant supérieur au HRT, un digesteur donné pourra traiter un plus grand débit de substrat. Les performances du digesteur (notamment la quantité de gaz produite en fonction du volume de digesteur) seront donc meilleures.

3.7. PRINCIPES DE DIMENSIONNEMENT

Contrairement à ce que l'on pourrait espérer, le paramètre fondamental qui va conditionner la dimension du digesteur est la quantité de substrat disponible et non la production de gaz

²⁰ Source : Réf. 22.



souhaitée. Pour qu'un digesteur fonctionne convenablement, il est indispensable que l'alimentation en substrat soit ajustée. La disponibilité en substrat est donc le facteur limitant.

Si le digesteur est trop petit, une surcharge organique entrainera une trop forte production d'Acide Gras Volatils (AGV)²¹. La baisse du pH qui en découlera inhibe l'activité des microorganismes réalisant l'acétogenèse et la méthanogenèse.

Si le digesteur est trop grand, cela représente un investissement plus important pour une production qui sera de toute façon limitée par la quantité de substrat.

En connaissant la quantité de substrat disponible et sur base de la Table 1, il est possible de déterminer le volume du digesteur à l'aide de la définition même du HRT (Equation 1). Ensuite, sur base du potentiel méthanogène du substrat, il est possible de prévoir la production de biogaz.

3.8. AGRICULTURE ET BIOMÉTHANISATION

À côté de son enjeu énergétique, la biométhanisation, au travers de l'utilisation du digestat, présente également un enjeu agricole. Le digestat obtenu au terme du processus de méthanisation est souvent décrit comme un engrais d'une grande qualité. Il représente une réelle opportunité pour les agriculteurs d'améliorer leur production tout en réduisant leurs dépenses liées à l'achat d'engrais chimiques. Pour bien comprendre les effets de l'utilisation du digestat en l'agriculture, il faut tout d'abord savoir de quoi celui-ci se compose et comment il est utilisé.

3.8.1. Description de l'effluent

Au cours de la digestion anaérobie, seuls 25 à 30% des matières sèches contenues dans le substrat sont convertis en gaz²². Le restant de matières sèches (organiques et inorganiques) est contenu sous forme de boue dans le mélange à la sortie du digesteur. Ce mélange est appelé digestat ou encore effluent. Celui-ci présente un taux de matières sèches inférieur à celui du substrat duquel il provient. Il est important de noter que la quantité d'effluent est quasi égale à celle de l'influent étant donné que seule une faible partie des matières sèches est

²¹ Pour plus de détails, se référer au TFE de Nicolas Zimmermann [Réf. 25].

²² Source : Réf. 23.



convertie en gaz et que les matières sèches elles-mêmes ne représentent que 8 à 10% de l'influent en voie humide.

Lors du processus de méthanisation, le carbone contenu dans les matières organiques est principalement transformé en méthane mais également en dioxyde de carbone pour une part moindre (si le milieu est bien anaérobie). La quantité de carbone contenue dans le mélange réactionnel diminue donc au cours de la digestion. Cela a pour effet d'abaisser le rapport C/N²³ et donc d'augmenter la concentration en azote de la solution.

De plus, l'azote, au départ principalement sous forme organique, est quant à lui minéralisé. Dans l'effluent, il se retrouve principalement dans des substances ammoniacales (à base de NH₄⁺ comme NH₄NO₃ ou NH₄OH principaux constituants des engrais chimiques azotés). De la même manière, le phosphate et d'autres éléments indispensables aux plantes comme le potassium et le magnésium vont se retrouver dans des substances minérales et seront donc directement assimilables par les plantes.

Finalement, la composition du digestat se rapproche davantage de celle d'un engrais chimique que de celle d'un fumier ou d'un compost. Cependant, il contient tout de même une fraction organique et les éléments contenus dans sa fraction minérale sont plus diversifiés que ceux présents dans un engrais chimique de synthèse.

3.8.2. Utilisation de l'effluent

L'effluent d'un biodigesteur est principalement utilisé pour amender les cultures. Dans une moindre mesure, il peut également être utilisé pour lutter contre les parasites de certaines plantes ou pour produire la nourriture de certains élevages (production de vers pour nourrir des volailles, des porcs, des poissons, ...). Dans cette section, nous nous intéresserons particulièrement à son usage en tant qu'engrais. Celui-ci peut s'opérer de trois manières différentes à savoir un emploi direct de l'effluent sous forme liquide, emploi sous forme sèche ou une intégration à un compost.

L'utilisation de l'effluent sous forme liquide permet d'apporter celui-ci directement aux plantes. Il peut être appliqué à travers une pulvérisation foliaire, conduit au pied des cultures

²³ Rapport de la quantité de carbone sur la quantité d'azote présente dans une matière organique. Ce rapport représente le taux de dégradabilité de la matière.



à l'aide d'un seau ou d'un canal d'irrigation ou tout simplement épandu sur le sol. L'avantage de ce mode d'utilisation est qu'aucun élément nutritif n'est perdu grâce à l'application directe. En outre, l'eau contenue dans l'effluent participe à l'irrigation des cultures. Le principal inconvénient de cette méthode est que l'engrais est difficile à transporter puisqu'il est principalement constitué d'eau. Il faut donc déplacer de grandes quantités d'eau pour finalement assez peu d'éléments fertilisants. De plus, si les canaux d'irrigations sont trop longs, la répartition n'est pas uniforme et un phénomène d'accumulation de minéraux peut apparaître.

À cause du problème de transport, certains agriculteurs préfèrent employer l'effluent sous forme sèche. Toutefois, le séchage de l'effluent diminue son potentiel de fertilisation car il perd une partie de son azote. Ce dernier étant principalement présent sous forme d'ions NH_4^+ , il est donc instable et va s'évaporer en réagissant avec des molécules présentes dans l'atmosphère. De plus, une fois séché, il doit être utilisé dans les plus brefs délais sans quoi la perte des éléments nutritifs se poursuit. C'est pour cela que la forme sèche est la façon la moins efficace d'utiliser l'effluent.

Pour terminer, l'effluent peut être composté avec d'autres matières organiques dans une fosse prévue à cet effet (c'est l'utilisation la plus fréquente au Burkina Faso). Un volume d'effluent suffit pour composter 3 à 4 volumes de résidus végétaux secs²⁴. L'effluent apporte l'eau nécessaire au bon déroulement du compostage. Cette dernière méthode « dénature » quelque peu l'effluent étant donné que sa composition change. Désormais, il est davantage similaire à un compost et qu'à un engrais chimique. Ici, le digestat permet principalement d'améliorer le compost notamment en abaissant son rapport C/N.

Remarque importante : il faut garder à l'esprit que la digestion anaérobie ne détruit pas tous les pathogènes, virus et nématodes²⁵. Il faut donc être particulièrement prudent si le digestat est utilisé sur des cultures de fruits ou de légumes. Seul un compostage (accompagné d'une montée en température suffisante) ultérieur au processus de méthanisation permet d'assurer l'hygiénisation des fumiers.

²⁴ Source : Réf. 23.

²⁵ Embranchement de vers non segmenté. Certains sont des parasites pour l'homme ou les animaux.



3.8.3. Effets sur les cultures

L'utilisation du digestat comme engrais permet une augmentation significative des rendements de production d'un grand nombre de cultures. Il permet notamment une augmentation de 10 à 30% de la production céréalière par rapport à des champs amendés au fumier²⁶. Les augmentations sont encore plus importantes s'il est utilisé en combinaison avec des engrais chimiques. Cependant ces derniers sont onéreux en Afrique et en particulier au Burkina Faso.

L'effluent de par sa composition, agit de manière similaire aux engrais chimiques. Il contient principalement des éléments nutritifs minéraux directement assimilables par les plantes. Il permet donc de nourrir de manière efficace les cultures afin d'accélérer et d'amplifier leur croissance.

À court terme les résultats sont donc extrêmement encourageants pour les agriculteurs comme l'avaient permis en leur temps les engrais minéraux de synthèse. Or, ceux-ci accompagnés de la monoculture ont engendré par la suite l'apparition de nombreux problèmes (développement à outrance des parasites, maladies, baisses de rendement, diminution de la fertilité naturelle des sols, etc.). Dès lors, il semble judicieux de ne pas regarder uniquement l'effet du digestat sur la plante mais également ses effets sur le biotope dans lequel celle-ci se développe et en particulier sur le sol.

3.8.4. Effets sur le sol

L'importance du sol est bien souvent sous-estimée en agriculture. En effet, l'agriculture conventionnelle des pays industrialisés considère le sol comme un simple support. La plante y est plantée et est ensuite nourrie et traitée par une panoplie de produits chimiques. Cela a abouti au célèbre trio « semences améliorées – engrais – pesticides » largement répandu dans les pays industrialisés depuis la révolution verte.

Or, le sol, contrairement aux deux autres milieux de notre planète (l'air et l'eau), n'est pas un milieu inerte et purement minéral. Il est organominéral et c'est un milieu vivant. Le sol constitue donc un fragile équilibre qu'il est important de considérer et de respecter si l'on désire le maintenir en vie. Un sol vivant est constitué d'humus stables et sera donc fertile.

²⁶ Source : Réf. 23.



Celui-ci abrite tout un écosystème qui assure sa cohésion. Le phénomène d'érosion est inexistant sur ce type de sol.

Pour maintenir un sol vivant, il est indispensable de le nourrir, et plus précisément de nourrir la vie qu'il contient, par des apports de matières organiques (déchets verts, compost, fumier, etc.). Celles-ci serviront de base au processus d'humification²⁷. Les humus ainsi créés vont se lier aux argiles provenant de la roche mère, ce qui aboutira à la création du complexe argilo-humique. Ce dernier joue un rôle majeur dans la stabilité du sol et dans la nutrition des plantes. L'application du digestat (en grande partie minéral) sur un sol ne participera pas aux processus naturels de formation du complexe argilo-humique. Autrement dit, il ne nourrit pas la vie du sol mais amène uniquement des éléments nutritifs directement assimilables par les plantes. Si l'action du digestat se limitait à cela, il n'y aurait aucun problème.

Or, de par son faible rapport C/N, l'effluent « provoquera une minéralisation rapide de la matière organique du sol »²⁸. En effet, les bactéries qui opèrent la minéralisation se multiplient avec l'azote. Un apport trop important de ce dernier favorise la minéralisation de la matière organique aux dépens de l'humification. La diminution de la matière organique du sol est le point de départ de la mort de celui-ci dont la première étape est la mort biologique²⁹. Le milieu se minéralisant petit à petit et la faune du sol n'étant plus nourrie, la vie va disparaître au sein de celui-ci. À terme, en possession d'un support devenu inerte, les agriculteurs n'auront plus d'autres choix que d'avoir recours aux engrais chimiques et aux pesticides en suivant le modèle agricole occidental.

Afin de préserver ou de restaurer les sols des pays en voie de développement, il est indispensable de procéder à un apport majeur de matière organique. Les effluents d'un biodigester devront donc obligatoirement être compostés³⁰ car leur application directe participe activement à la dégradation des sols. Il ne faut donc pas uniquement se fier aux résultats à court terme et aux effets sur les cultures mais il faut surtout veiller à ce que l'intégration d'un biodigester dans l'agriculture rurale participe à rendre celle-ci durable.

²⁷ Processus lors duquel les matières organiques sont transformées en humus.

²⁸ Source : Réf. 23.

²⁹ Source : Réf. 4.

³⁰ En pratique c'est déjà le cas en grande partie au Burkina Faso



3.9. CONDITIONS POUR LA MISE EN PLACE DE BIODIGESTEURS

Pour qu'un projet de biodigester domestique soit une réussite, il faut préalablement vérifier que le cadre soit adéquat. En effet, la digestion anaérobie est un processus biologique naturel relativement fragile et qui nécessite donc que certaines conditions soient remplies. De plus, le fonctionnement d'un digester demande un suivi et un travail quotidiens. Idéalement, un projet d'installation de biogaz domestique nécessite une étude de faisabilité pour s'assurer que l'ensemble des conditions soient remplies.

3.9.1. Température

Les digesteurs domestiques sont dépourvus de système de chauffage. Il n'est donc pas possible de les installer dans toutes les régions du monde. Pour une méthanisation efficace, il est préférable que celle-ci se produise en régime mésophile (le psychrophile étant très lent et nécessite des volumes de digesteurs encore plus importants). Pour ne pas interrompre la méthanisation dans ce régime, il faut que la température soit supérieure à 15°C tout au long de l'année. La figure suivante montre les zones du monde (en gris foncé) où cette condition est remplie.

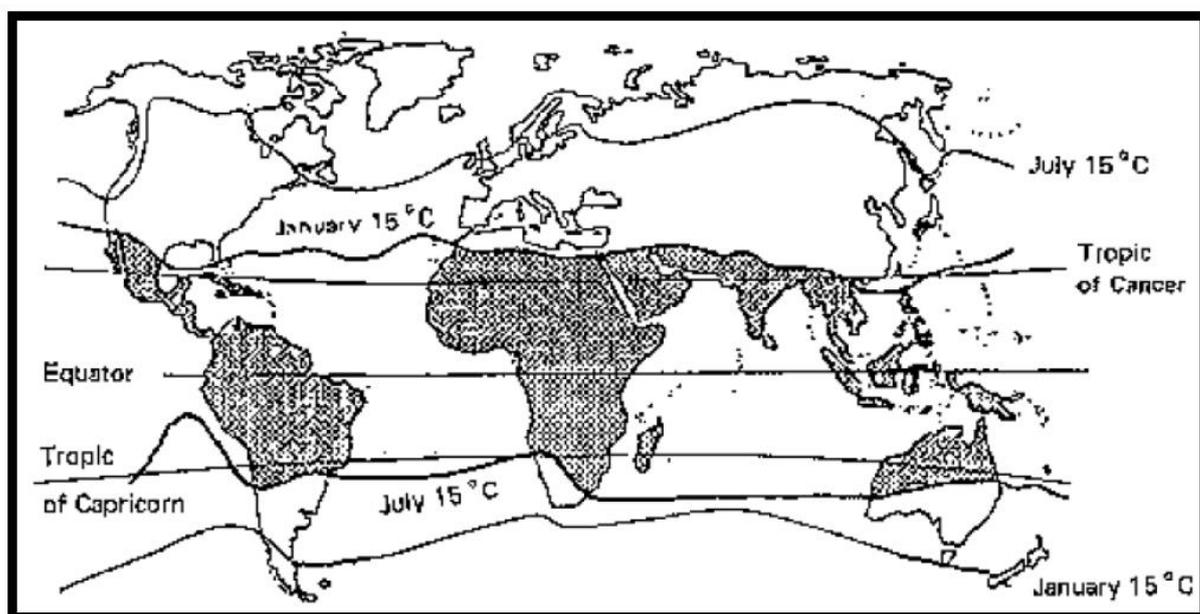


Figure 12 : Carte d'isothermes de 15°C en Janvier et en Juillet [Réf. 14]

La plupart des PVD se situent dans la zone adéquate pour l'installation de digesteurs domestiques. En dehors de cette zone et en l'absence de système de chauffage, il n'est pas

possible de remplir les conditions du régime mésophile. Le climat du Burkina Faso est particulièrement bien adapté car le pays se trouve quasi au centre de cette zone.

3.9.2. Disponibilité du substrat

Le substrat peut être de différentes natures. Dans le cas des digesteurs domestiques en milieu rural, le substrat le plus utilisé est du lisier. Du fumier ou des déchets verts pourraient également être employés. Par contre, ceux-ci ne sont pas présents en quantité dans les zones sèches. Il n'y a que très peu de végétation et l'ensemble des feuilles, des branches et des herbes sont mangées par les animaux. En milieu urbain, un digesteur domestique pourrait être alimenté par les ordures ménagères organiques.

Cependant, la plupart des technologies de digesteurs domestiques actuellement développées sont destinées au milieu rural. C'est d'ailleurs là que l'intérêt est le plus grand pour les PVD. De plus, l'usage de lisier autorise une méthanisation en voie humide qui permet aisément de travailler en continu.

La disponibilité du substrat est un facteur déterminant pour le bon fonctionnement d'un digesteur. Comme expliqué au point 3.7, c'est ce paramètre-même qui conditionne le dimensionnement. Il est donc indispensable que l'élevage qui fournira le substrat soit présent sur le même site que le biodigesteur et le plus près possible idéalement. Le remplissage quotidien du digesteur ne permet pas de devoir déplacer le substrat sur de longues distances. Une telle contrainte entraînerait l'abandon du système au bout de quelques semaines. Comme il nous faudra le constater plus loin, cette condition s'avère problématique dans le cadre du projet de la clinique.

De plus, il ne suffit pas de posséder des animaux en suffisance pour que la disponibilité du substrat soit assurée. Il faut tenir compte également du mode de collecte. Il est quasiment impossible de récupérer les déjections d'animaux divagants. Or, au Burkina, la plupart des animaux sont laissés en liberté afin qu'ils puissent trouver leur nourriture. Si un projet de biodigesteur est envisagé, il faudra prévoir de garder les animaux à l'étable au minimum durant la nuit afin que la collecte du substrat soit possible.



3.9.3. Disponibilité en eau

Comme mentionné au point 3.5, en voie humide, les déjections doivent être mélangées à de l'eau afin que le taux de matières sèches du substrat permette une bonne hydrolyse. Or, c'est dans les zones les plus sèches que la quantité d'eau à ajouter est souvent la plus importante. Il est donc indispensable dans tous projets de biodigester de s'assurer d'une disponibilité en eau suffisante à la préparation du substrat.

Dans les zones les plus arides, cette condition n'est pas toujours remplie. Une solution pour pallier ce problème est de compléter le mélange par du digestat afin d'abaisser suffisamment le taux de matières sèches. Cela revient en quelque sorte à procéder à une recirculation. Cette pratique peut être mise en place uniquement si le digesteur est conçu de telle sorte que le SRT soit supérieur au HRT. Dans ce cas et uniquement dans ce cas, le digestat contiendra plus d'eau que le substrat étant donné que la matière organique est retenue plus longtemps. Cette pratique permet donc de réduire les besoins en eau liés au fonctionnement du digesteur. Elle a notamment été éprouvée dans le cadre de l'utilisation de digesteur à dôme fixe³¹.

3.9.4. Intérêt de la population

Le biogaz domestique n'est pas un projet qui peut être mis en place par des décideurs et imposé à la population. Il est indispensable que ce soit les utilisateurs qui soient porteurs du projet. En effet, comme nous l'avons vu, faire du biogaz demande un travail et un suivi quotidiens sans quoi les résultats ne seront pas au rendez-vous.

Dans un premier temps, il est indispensable d'informer la population sur les avantages et les bienfaits qu'un digesteur peut leur apporter. Ensuite, il faut qu'il y ait une réelle volonté de leur part de mettre en place un tel projet.

C'est lorsque les utilisateurs du biogaz s'occupent eux-mêmes du fonctionnement du digesteur que celui-ci atteint ses meilleures performances. En effet, la manipulation du substrat et du digestat ne sont pas des tâches agréables et gratifiantes. Si les opérateurs ne mesurent pas les enjeux, ces besoins seront vite abandonnés ou mal effectués et le fonctionnement du digesteur ne sera que de courte durée. En plus de cela, il est nécessaire

³¹ Source : Réf. 22.



que ces gens soient formés et suivis afin de veiller à résoudre avec eux les éventuels problèmes qui pourraient survenir. Sans tout cela, il est difficile d'espérer obtenir une production durable.



4. INTÉGRATION DE LA BIOMÉTHANISATION DANS LE CADRE DE LA CLINIQUE

Comme expliqué au chapitre 2, à l'origine, le développement d'une unité de biométhanisation avait pour but entre autres d'assurer les besoins en énergie thermique de la clinique et de cette manière lui offrir une certaine indépendance de ce point de vue. Le développement ayant bien progressé l'an passé, il était maintenant temps de songer à l'intégration d'une unité sur le site de la clinique.

Ce chapitre expose les recherches, la réflexion et les conclusions qui ont eu lieu durant le stage. Il débute naturellement par une description de la situation et une analyse des besoins. Ensuite, nous envisagerons l'intégration d'un biodigesteur sur le site et des contraintes que cela engendre. Enfin, le chapitre se conclut en proposant d'autres alternatives pour l'approvisionnement énergétique dans le cas de cette clinique.

4.1. ANALYSE DES BESOINS EN ÉNERGIE DE LA CLINIQUE

4.1.1. Situation existante

La clinique du docteur Bertrand Kaboré se situe à Yagma, environ à 15 km de Ouagadougou. Le site sur lequel est prévu la construction de l'ensemble du dispensaire à une superficie de 1 ha. Actuellement, seul le premier bâtiment est terminé. Celui-ci accueillera le service de gynécologie et ouvrira ses portes dès que l'approvisionnement en énergie le permettra.

En effet, le quartier où se situe la clinique n'est pas desservi en électricité. La mise en place d'une nouvelle ligne n'est pas prévue avant plusieurs années. Dans ce contexte, il n'y a presque pas d'autre choix que d'être autonome en énergie. Il est donc impératif de mettre en place rapidement les moyens de production nécessaires afin de rendre le service opérationnel.

4.1.2. Besoins en électricité

Pour son fonctionnement, la clinique a évidemment besoin d'électricité. Tout d'abord pour assurer un certain nombre de fonctions de base qui sont retrouvées dans la plupart des bâtiments du Burkina comme l'éclairage, la ventilation et la climatisation. À côté de cela, certains équipements médicaux fonctionnent à l'électricité comme un échographe par exemple. Le tableau suivant reprend l'ensemble des postes de consommation afin d'estimer le besoin total en énergie électrique de la clinique.



Équipement	Puissance [W]	Nombre	Taux d'utilisation	Temps de fonctionnement [h/j]	Consommation journalière [kWh/j]
Éclairage	50	20	100%	12	12,00
Brasseur d'air	50	12	90%	10	5,40
Climatisation	9111	1	80%	12	87,47
TV	35	4	90%	8	1,01
Réglette bloc 60	9	12	100%	12	1,30
Réglette bloc 120	18	19	100%	12	4,10
Echographe	200	1	90%	2	0,36
Total					111,63

Table 2 : Estimation des besoins en électricité de la Clinique

Nous pouvons observer que la clinique aurait une consommation électrique d'environ 110 kWh par jour. Nous constatons également que le plus gros poste de consommation est la climatisation qui représente près de 80% du total.

La solution envisagée pour produire cette énergie est évidemment l'installation de panneaux photovoltaïques. Vu l'ensoleillement en Afrique, cette solution est parfaitement bien adaptée. De plus, c'est généralement lorsqu'il y a le plus de soleil que l'utilisation de la climatisation est la plus importante. Il n'y a donc pas (ou en tous cas moins) de problèmes de décalages temporels trop importants entre la production et la consommation.

L'inconvénient majeur de cette solution est son coût. En effet, non seulement l'investissement de départ est extrêmement élevé mais le remplacement des batteries qui doit se faire périodiquement est onéreux. Toutefois, il ne semble pas y avoir de meilleure alternative pour la production d'électricité sur le site de la clinique.

4.1.3. Besoins en chaleur

Les besoins en chaleur sont quant à eux fort réduits vu le climat du Burkina Fosa. Il n'y a guère besoin de chauffage dans les bâtiments. Au contraire, c'est l'usage des climatiseurs qui prône.

Les besoins en chaleur de la clinique se cantonnent donc à la stérilisation du matériel médical. Celle-ci se fera par deux voies différentes. La première consiste à chauffer de l'eau jusqu'à ébullition et d'y plonger le matériel à stériliser. Ce mode de stérilisation est simple et ne nécessite aucun équipement sophistiqué. L'énergie nécessaire pour cette procédure dépend de la quantité d'eau chauffée quotidiennement et du rendement du brûleur. Cependant, une stérilisation dans de l'eau à 100°C n'est pas complète. Dans certain cas, un niveau de stérilité plus poussé est requis.



La deuxième façon de procéder consiste à utiliser de la vapeur surchauffée afin d'atteindre des niveaux de températures supérieurs. La mise en place de ces conditions est réalisée au sein d'une autoclave. Les autoclaves fonctionnent généralement à l'électricité (puissance généralement comprise entre 2 et 3 kW). En effet, outre la fonction de chauffage, l'autoclave est muni d'une série d'équipements électriques (pompe à vide, processeur pour la régulation et la gestion des cycles, ...). Des autoclaves assurant leur fonction de chauffage à l'aide de gaz existent également. Ce type d'autoclave est cependant moins répandu et nécessitera tout de même une alimentation électrique pour le fonctionnement de ses équipements. Reste à savoir si celles-ci peuvent être adaptées pour être alimentés par du biogaz.

Les besoins exacts en énergies thermiques sont donc difficiles à estimer. Le chauffage de quelques casseroles d'eau ne nécessitera pas une grande quantité de biogaz. Cependant, un autoclave de 3 kW consommera environ 0,550 Nm³ de biogaz par heure de fonctionnement. De grosses productions de gaz ne seront donc nécessaires que si l'on souhaite alimenter celles-ci à l'aide d'un biodigesteur.

4.2. INTÉGRATION D'UN BIODIGESTEUR SUR LE SITE

Comme déjà mentionné, l'idée de départ était de développer des unités de biométhanisation pour pouvoir entre autres, équiper le site de la clinique. Cependant, au fil de nos recherches nous nous sommes aperçus que l'installation et le fonctionnement d'un digesteur nécessitent que certaines conditions soient remplies. De plus, l'utilisation du biogaz a, elle aussi, ses limites.

4.2.1. Conditions à remplir

Pour commencer, comme nous l'avons vu au point 3.9, il y a un certain nombre de conditions qu'il est indispensable de respecter pour que l'installation d'un biodigesteur domestique soit un succès. Or, nous avons constaté que certaines de ces conditions ne pouvaient être remplies sur le site de la clinique.

Le premier problème est la disponibilité en substrat. En effet, le site de la clinique ne peut accueillir un élevage pour la simple et bonne raison que l'ensemble de l'espace est destiné à la construction du dispensaire. Il n'y a donc quasi aucune possibilité que la bouse soit produite



et collectée sur place. L'achat de bouse n'est pas viable économiquement et la production sur un autre site et le transport semblent voués à l'abandon vu la pénibilité de ces tâches.

Deuxièmement, le biogaz sera utilisé pour la clinique. Ce sont très certainement des salariés sans lien avec les activités médicales qui s'occuperont du fonctionnement du biodigesteur. Ceux-ci ne sont donc ni les porteurs du projet ni les bénéficiaires de la production. Il sera donc plus difficile dans ces conditions d'assurer un bon fonctionnement de l'installation et une production fiable et constante.

4.2.2. Utilisation du biogaz

Les nombreux biodigesteurs domestiques construits dans les zones rurales d'Afrique ont pour but de subvenir aux besoins des populations locales. Le biogaz est donc principalement utilisé pour la cuisson et l'éclairage.

En réalité, ces deux applications sont préférentielles pour l'usage du biogaz car elles sont peu exigeantes en termes de qualité et de pression. L'emploi du biogaz pour des applications plus sophistiquées (comme un moteur, un autoclave, etc.) peut s'avérer complexe. En effet, dans bien des cas ces applications nécessitent une pression de gaz constante et bien définie. De plus, pour certains usages une purification est nécessaire afin d'ôter le H₂S (source de corrosion) susceptible de détériorer les équipements voire le CO₂ si un taux de méthane plus élevé est nécessaire.

Dès lors, la question se pose quant à la possibilité d'utiliser du biogaz pour alimenter un autoclave. Cela n'est sans doute pas impossible mais le taux limité de méthane (entre 50 et 60%), la variabilité de la composition et la variation de la pression risquent de rendre cela complexe.

4.2.3. Conclusion

Au regard des différents constats effectués ci-dessus, la possibilité d'utiliser du biogaz sur le site de la clinique semble être remise en question. Premièrement, une production sur site est compromise étant donné que certaines conditions ne sont pas remplies, surtout à cause de la disponibilité en substrat. De plus, comme l'utilisation du biogaz pour l'autoclave (principal poste de consommation) risque d'être relativement complexe, l'intérêt même du biodigesteur



dans le cadre de la clinique peut légitimement être contesté. En conclusion, il nous est apparu raisonnable d'envisager d'autres sources d'énergie plus propices à mettre en place.

4.3. ALTERNATIVES POUR L'APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE

Comme développé ci-dessus, l'option vers laquelle s'oriente le projet est l'installation de panneaux photovoltaïques pour fournir les besoins en électricité. Malgré son coût élevé cette technologie a l'avantage de ne pas demander (trop) de main-d'œuvre. Certes, il y a la maintenance de l'installation généralement prise en charge par un organisme externe spécialisé, mais en dehors de cela, l'utilisateur ne doit pas d'occuper de faire fonctionner l'installation. En plus des conditions qui ne sont pas remplies pour son utilisation, un biodigesteur, lui, demande un travail quotidien pour son alimentation.

Après mûre réflexion avec le docteur Bertrand Kaboré, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il serait judicieux d'opter pour un autoclave électrique (bien plus répandu sur le marché) afin qu'il puisse être alimenté par l'installation solaire. Il ne resterait donc plus qu'un très faible besoin en chaleur pour le chauffage de l'eau. Celui-ci pourrait être réalisé à l'aide de bouteilles de butane. Certes il ne s'agit plus dans ce cas d'une énergie renouvelable mais d'un point de vue économique et de facilité d'utilisation, les bouteilles de butane s'avèrent meilleures que le biogaz.

À ce stade du projet, c'est donc l'installation des panneaux photovoltaïques qui était l'étape clé pour permettre l'ouverture du service gynécologie. Nous avons donc aidé M. Bertrand Kaboré pour l'appel d'offres et la comparaison des propositions. Le principal obstacle étant le coût, nous avons suggéré dans un premier temps d'envisager une installation électrique sans climatisation afin de réduire considérablement les besoins et donc la taille de l'installation de PV. Nous avons alors obtenu un devis de 5 millions de francs CFA pour cette première phase contre 15 millions pour l'ensemble de l'installation.

Grâce à l'étude du cas de sa clinique, le docteur Kaboré possède maintenant tous les éléments nécessaires pour en réaliser l'approvisionnement énergétique.



5. PRÉSENTATION DU PROGRAMME NATIONAL DES BIODIGESTEURS DU BURKINA FASO

Lors du premier mois d'investigations, une rencontre avec le Programme National des Biodigesteurs du Burkina Faso (PNB-Bf) a pu être organisée. Celle-ci a permis un échange très instructif afin de mieux connaître le PNB-Bf, son implication et ses activités. Les experts que nous avons rencontrés nous ont expliqué le fonctionnement de leur technologie et les raisons pour lesquelles celle-ci a été choisie pour la mise en place de vastes programmes nationaux comme ce fut le cas au Burkina mais aussi dans de nombreux autres pays d'Afrique et d'Asie.

Ce chapitre débute par l'historique de création du programme ainsi que ses objectifs. Ensuite, la technologie des digesteurs à dôme fixe sera décrite en détail. C'est celle-ci qui est mise en place au niveau du programme national. Pour finir, nous présenterons les activités ainsi que les résultats du PNB-Bf après près de 10 ans d'existence.

5.1. HISTORIQUE

En l'an 2000, avec l'avènement du nouveau millénaire, les Nations Unies ont émis 8 objectifs dénommés Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). Les 193 Etats membres de l'ONU ainsi qu'au moins 23 organisations internationales ont convenu d'atteindre ces objectifs en 2015³².

C'est dans le cadre de ces OMD qu'en 2006-2007 un groupe de partenaires internationaux ont lancé l'Initiative Africaine sur le biogaz (Biogas for Better Life) validée par 27 pays africains. Cette dernière vise la création d'un partenariat entre le secteur public, le secteur privé, des ONG et les partenaires du développement dans les pays africains afin de permettre à 2 millions de ménages de disposer de digesteurs domestiques pour l'horizon 2020.

À la suite de cette initiative, la GIZ³³ a mené, en avril 2007, une étude de faisabilité d'un programme national de biogaz au Burkina Faso. Celle-ci a estimé le potentiel à 90 000 biodigesteurs domestiques principalement alimentés par des déjections animales. La SNV et

³² Dans la continuité des OMD, les Nations Unies lanceront en 2015 les Objectifs pour le Développement Durable (ODD) à atteindre pour l'horizon 2030.

³³ Agence de coopération internationale allemande pour le développement



l'IRSAT³⁴ se sont ensuite joints à la GIZ afin de réaliser, en 2008, une analyse institutionnelle pour faciliter la mise en place du programme national.

De son côté la SNV, en partenariat avec Hivos³⁵ et le Ministère des affaires étrangères des Pays-bas, a créé l'ABPP (African Biogas Partnership Program ou Programme de Partenariat du Biogaz Africain). Celui-ci est entièrement financé par ses 3 entités créatrices et a pour objectif de soutenir les programmes nationaux de biodigesteurs domestiques dans 5 pays d'Afrique à savoir l'Éthiopie, le Kenya, la Tanzanie, l'Ouganda et le Burkina Faso.

Grâce aux études réalisées dans le cadre de l'initiative africaine du biogaz et au soutien de l'ABPP, le Programme National des Biodigesteurs du Burkina Faso a vu le jour. Celui-ci a débuté ses activités en janvier 2010. Il s'agit donc d'un programme de l'Etat burkinabé qui profite toujours du support financier de l'ABPP et du support technique de la SNV.

Il est à noter que la SNV est une référence mondiale dans le domaine des biodigesteurs domestiques. Elle développe des digesteurs domestiques depuis plusieurs décennies maintenant et est actuellement présente dans 17 pays en Asie et en Afrique où elle a participé à la mise en place de programmes nationaux. Elle compte à son actif l'appui à la construction de pas moins de un million de digesteurs au profit de quelques 7 millions de personnes à travers le monde. La SNV est réellement un partenaire clé du PNB-Bf.

5.2. OBJECTIFS DU PROGRAMME NATIONAL

« L'objectif global du PNB-Bf est de contribuer à la création d'un secteur permanent (viable et orienté vers le marché) multi-acteurs de construction et d'exploitation des biodigesteurs afin d'améliorer les conditions de vie, d'accroître de manière durable les productions agro-pastorales et de lutter contre la pauvreté des ménages ruraux et péri-urbains. »³⁶.

Le PNB-Bf joue donc un rôle d'encadrant et de promoteur dans le développement du biogaz au Burkina Faso. Le déploiement du programme est organisé en différentes phases. La

³⁴ Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (Burkina Faso)

³⁵ Hivos (Humanistisch Instituut voor Ontwikkelingssamenwerking) est une organisation néerlandaise active dans le développement et en particulier dans le développement social des PVD.

³⁶ Source : Réf. 19.



première phase s'est déroulée de janvier 2010 (date de la création) à décembre 2013 et son objectif était l'appui à la construction de 6 000 digesteurs domestiques. La phase numéro deux a succédé à la première. Celle-ci se termine en décembre 2018 et son objectif est l'appui à la construction de près de 12 000 digesteurs supplémentaires. (Les résultats du PNB-Bf sont présentés plus loin)

5.3. LES DIGESTEURS DU PROGRAMME NATIONAL

5.3.1. Origines et choix de la technologie

Le digesteur promu par le PNB-Bf est de type digesteur à dôme fixe (*Fixed Dome Biodigester* ou FDBD). Le premier modèle de FDBD a été développé en Chine vers 1936. L'objectif de cette nouvelle conception était de pallier le problème des digesteurs à système de stockage mobile³⁷. Les FDBD ont l'avantage d'être très simples et très robustes. Ils présentent une durée de vie d'une vingtaine d'années voire plus.

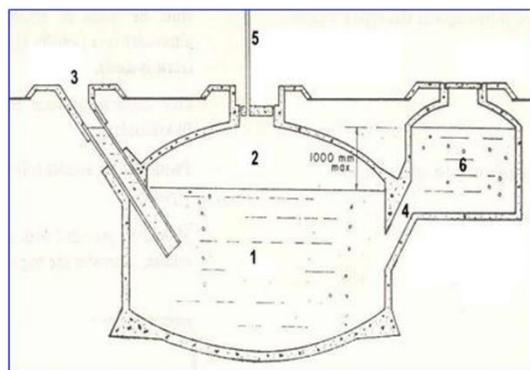


Figure 13 : Modèle chinois de digesteur à dôme fixe

Depuis le modèle chinois de 1936, de nombreuses améliorations et adaptations ont été apportées à ce FDBD. Celles-ci diffèrent quelque peu en fonction des régions. Les FDBD se sont imposés un peu partout dans le monde. Actuellement, la majeure partie des digesteurs domestiques sont de ce type. D'autres digesteurs « *low cost* » ont vu le jour plus récemment mais leurs performances n'ont encore jamais atteint celles du FDBD.

Lors de son lancement, le PNB-Bf a profité de l'expertise de son partenaire, la SNV, quant au choix de la technologie sur laquelle se baser. À cette époque, la SNV avait déjà lancé de

³⁷ Les premiers biodigesteurs *low tech* étaient équipés d'un gazomètre afin d'assurer le stockage. Ceux-ci avaient l'avantage d'offrir une pression de gaz en sortie constante. Par contre, ils sont onéreux, demandent beaucoup de maintenance et présentent d'importants problèmes de corrosion au niveau de la partie mobile du gazomètre surtout si celle-ci est en métal.

nombreux plans nationaux principalement en Asie. À chaque fois, ce sont les FDBD qui se sont avérés être la technologie la plus appropriée.

5.3.2. Conception

Les digesteurs à dôme fixe sont enterrés et sont réalisés en maçonnerie. La construction d'un tel bâtiment nécessite un savoir-faire particulier afin que l'étanchéité soit assurée. Seuls des maçons spécialement formés à cet effet peuvent réaliser une telle œuvre.

Le biodigesteur se compose principalement de 5 parties (Figure 14), à savoir le bassin d'alimentation, le réacteur, le dôme de stockage, le bassin d'évacuation et la sortie du gaz.

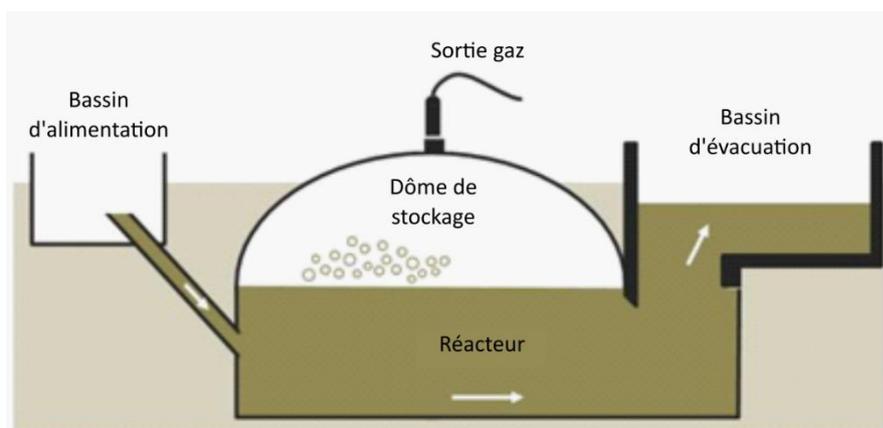


Figure 14 : Schéma d'un digesteur à dôme fixe [Réf. 25]

Comme le montre la figure, la configuration est relativement simple. Il n'y a aucune pièce mobile ni aucune vanne sur l'entrée et la sortie du digesteur. Le gaz, lorsqu'il est produit, est simplement stocké dans le dôme. Celui-ci est dimensionné en fonction de la durée sur laquelle la production doit pouvoir être stockée (typiquement la durée maximale entre deux utilisations de biogaz)

5.3.3. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de ce type de digesteur est relativement simple mais également très ingénieux. Il s'agit d'un réacteur continu. L'alimentation se fait donc quotidiennement après la collecte de la bouse.

Tout d'abord, la bouse est versée dans le bassin d'alimentation où elle sera mélangée à l'eau. Celui-ci est parfois équipé d'un système de mélangeage afin de faciliter la préparation du substrat. Ensuite, ce substrat coule jusque dans le digesteur sous l'effet de la gravité.

La fermentation a ainsi lieu dans la partie « réacteur » et produit du gaz. Celui-ci étant plus léger que les liquides et les solides, il va former de petites bulles au sein du substrat et remonter à travers ce dernier pour aller s'accumuler dans le dôme. Au fil de la production, la pression dans le dôme va augmenter.

L'évacuation du digestat se fait selon le principe des vases communicants. Le bassin d'évacuation (aussi appelé bassin de compensation) est surélevé par rapport au volume du digesteur. Lors de l'augmentation de la pression, les niveaux ne vont plus s'équilibrer et une partie du contenu du réacteur va être poussée vers le bassin d'évacuation (qui lui est à pression atmosphérique).

La seule tâche de l'utilisateur est donc l'alimentation du digesteur (et la consommation du gaz bien sûr). L'évacuation se fait de manière passive. Le surplus du bassin de compensation va se déverser vers des fosses prévues pour stocker le digestat. Ce dernier étant utilisé comme engrais pour l'agriculture.

5.3.4. Configuration

Pour qu'un tel fonctionnement soit possible, la configuration et le dimensionnement doivent respecter certaines contraintes notamment en ce qui concerne les niveaux des différents bassins.

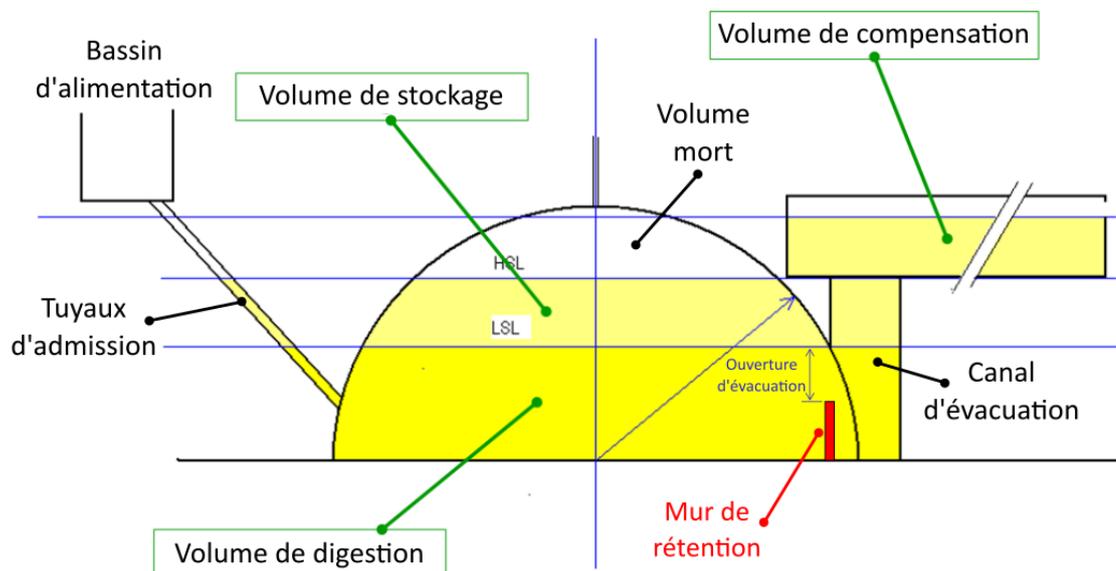


Figure 15 : Configuration d'un biodigérateur à dôme fixe [Réf. 22]

Le fonctionnement du réacteur engendre des variations de niveaux au sein de celui-ci. Le niveau de substrat dans le digesteur va varier entre un niveau maximum (HSL sur la figure) et un niveau minimum (LSL sur la figure).

Le niveau maximum du substrat (HLS) est atteint lorsque la pression dans le dôme est égale à la pression atmosphérique. Dans ce cas, le niveau est le même dans le digesteur, dans le tuyau d'admission et dans le canal d'évacuation. Ce niveau correspond à la hauteur du fond du bassin de compensation. A ce moment la réserve de gaz est à son minimum et seul le volume mort contient du gaz qu'on ne peut pas extraire car à pression atmosphérique.

Le niveau minimum du substrat (LSL) est atteint lorsque la pression dans le réservoir de gaz (volume de stockage) est maximale. Dans ce cas, une partie du mélange passe dans le bassin de compensation afin de laisser la place au gaz. Ce dernier sera rempli en même temps que le réservoir de gaz. Le volume de compensation et le volume de stockage du gaz seront donc égaux (la hauteur du volume de compensation et la pression exercée par le volume de gaz stocké seront en équilibre hydrodynamique). Le niveau minimum correspond à la hauteur de l'ouverture d'évacuation. Si le volume de gaz dépasse le volume de stockage prévu, le niveau va descendre en dessous du minimum (LSL) et une partie du gaz pourra potentiellement s'échapper via le canal d'évacuation.

Il est également à noter que le fond du bassin d'alimentation doit se trouver au-delà du niveau maximum du bassin d'évacuation afin d'éviter que du substrat ne ressorte par l'alimentation.

Les nombreuses années d'études de la SNV sur les biodigesteurs à dôme fixe ont permis d'apporter une amélioration à la configuration de base. Comme expliqué au point 3.6, en retenant les matières organiques plus longtemps que l'eau (cela sous-entend aussi que les M.O. sont plus lourdes et moins solubles que le digestat), le rapport SRT/HRT augmente. Cela permet de réduire le volume du digesteur pour une production donnée car si le substrat y reste plus longtemps, il produit plus, s'il est trop mélangé et évacué trop tôt, il produira moins. Au niveau du digesteur à dôme fixe, cela a été implémenté par l'ajout d'un mur au niveau du canal de sortie (représenté en rouge à la Figure 15). Celui-ci retient le substrat du fond et laisse passer les phases supérieures principalement composées d'eau et de digestat plus soluble.

Cette configuration très aboutie fait du FDBD, en plus d'être robuste et durable, l'un des digesteurs domestiques les plus performants (dans la catégorie « *low tech* »).



5.3.5. Caractéristiques techniques

Il faut savoir que le PNB-Bf propose des digesteurs de différentes dimensions adaptés aux différentes tailles d'élevages des petits paysans du Burkina.

Le plus petit digesteur a un volume total (digesteur + stockage) de 4 m³ et est capable de produire 1 Nm³ de gaz par jour. Celui-ci a été dimensionné pour pouvoir assurer les besoins quotidiens de cuisson d'un ménage. Un minimum de deux vaches ou quatre porcs est nécessaire pour alimenter ce digesteur journalièrement. Son prix varie entre 280 000 et 320 000 francs CFA³⁸ en fonction de la zone et de la disponibilité des matériaux. Des digesteurs de 6, 8 et 10 m³ sont également proposés. Leurs caractéristiques techniques sont disponibles en annexe (voir annexe 12.1).

Comme précisé précédemment, ce type de réacteur a une durée de vie estimée de 20 à 30 ans. Il ne nécessite aucune maintenance. Une fois lancé, il peut produire pendant toute sa durée de vie sans interruption. Cependant, en fonction de la « propreté » du substrat, un entretien peut être nécessaire. Si le substrat contient du sable, des pierres ou d'autres matières inertes facilement décantables, une accumulation de celles-ci va encombrer le fond du digesteur de telle sorte que son volume utile sera réduit et donc également la production de gaz. Dans ce contexte, un nettoyage (qui engendre un arrêt du réacteur) est nécessaire tous les 5-6 ans.

5.4. LES ACTIVITÉS DU PROGRAMME NATIONAL

Comme mentionné précédemment, le PNB-Bf a pour rôle d'encadrer et de promouvoir le développement des biodigesteurs domestiques à l'échelle nationale. Pour ce faire, le PNB-Bf est principalement actif à 4 niveaux : les formations, le développement du secteur économique, le développement du micro-crédit et le suivi des projets.

La volonté du PNB-Bf est que le secteur atteigne l'autonomie. Pour cela, il a mis en place des formations pour les maçons, les aides maçons mais également pour les animateurs responsables du suivi de proximité. En plus de cela, il effectue un renforcement des compétences des ménages pour qu'ils aient une utilisation optimale des digesteurs. Cela

³⁸ Pour rappel, les digesteurs du PNB-Bf sont subsidiés par l'état à hauteur de 160 000 Fr. CFA



participe à la fiabilisation de la filière. Il opère également une assistance technique par des formations à l'étranger notamment au Mali, en Guinée et au Niger.

La construction et la vente de biodigesteurs a créé tout un secteur d'activités économiques. Le PNB-Bf veille au bon développement de celui-ci. Les formations de maçons ont permis la création d'entreprises de construction de biodigesteurs (ECB). Parmi celles-ci, quatre sont des entreprises privées et les quatre autres sont des entreprises coopératives. À côté de ces ECB, d'autres prestataires fournissent des services d'appui comme la réalisation des briques et des fouilles (terrassement). Des fournisseurs d'accessoires agréés par le PNB-Bf ont également vu le jour. Ceux-ci fournissent aussi bien du matériel aux ECB qu'aux ménages (peintures acryliques, matériel de plomberie, foyers, manomètres, etc.).

Les digesteurs sont principalement destinés aux populations rurales et en particulier aux populations les plus pauvres afin d'améliorer leur niveau de vie. Au niveau du financement, il est donc nécessaire de mettre en place des aides pour rendre la technologie accessible. Un subside de l'Etat est disponible à hauteur de 160 000 FCFA. En plus de cela, le PNB-Bf, en collaboration avec des organisations de micro-crédit, a mis en œuvre un « crédit biodigesteur » afin d'offrir un aide supplémentaire pour l'acquisition d'un digesteur.

Pour terminer, afin de s'assurer que la technologie est utile et utilisée, le PNB-Bf effectue un suivi des digesteurs. L'ensemble des informations des digesteurs construits dans le cadre du PNB-Bf sont collectées dans une base de données. Le PNB-Bf peut ainsi opérer un contrôle qualité et un suivi-évaluation. Un service clientèle est également disponible via le *call center*. Le PNB-Bf développe actuellement une application pour mobile afin de faciliter la collecte de données sur les digesteurs par les clients.

5.5. LES RÉSULTATS DU PROGRAMME NATIONAL

Depuis le lancement du PNB-Bf, près de 10 000 biodigesteurs ont été construits au Burkina Faso³⁹. Par rapport au potentiel estimé lors de l'étude de faisabilité, cela représente 10% du total. Ceux-ci offrent un accès à l'énergie renouvelable à plus de 150 000 personnes à travers le pays. Le suivi de plus de 90% des digesteurs est assuré par le programme et au moins 90%

³⁹ Source : Réf. 18.



des utilisateurs sont formés et soutenus en vue d'intégrer au mieux leur digesteur à leurs activités agricoles. Le développement du secteur a déjà permis jusqu'ici la création de plus de 1000 emplois⁴⁰.

Les résultats du Programme National des Biodigesteurs ont fait du Burkina Faso le moteur du développement du biogaz en Afrique de l'ouest. Du 10 au 12 novembre 2017, le pays a organisé une conférence internationale sur la technologie du biodigesteur à Ouagadougou. Celle-ci avait pour but de faire la promotion de la technologie mais également de réunir différents pays⁴¹ afin d'échanger à propos de leurs expériences respectives.

Au terme de cette conférence, le Burkina Faso a été mandaté « pour assurer le processus de mise en place de l'organe régional de coordination des programmes nationaux de biodigesteurs »⁴² dans les différents États. Le Président du Faso a été sollicité pour « faire le plaidoyer auprès de ses pairs pour le développement de nouveaux programmes nationaux et le renforcement de ceux existants »⁴³.

⁴⁰ Ibid.

⁴¹ Pays participants à la conférence : Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Éthiopie, Guinée Bissau, Guinée Conakry, Kenya, Mali, Niger, Sénégal, Tchad et Togo.

⁴² Source : Réf. 18.

⁴³ Ibid.



6. TRAVAIL RÉALISÉ AU SEIN DU CEAS BURKINA

À côté de l'étude du biogaz dans le contexte du Burkina et de l'étude du cas de la clinique, le stage avait également pour but de poursuivre le travail de développement réalisé au CEAS Burkina afin d'étudier une alternative intéressante aux systèmes existants tels que ceux du PNB-Bf.

Le présent chapitre débute par une définition des objectifs du développement et du stage réalisé. Ensuite le travail et les résultats des expériences menées sur le digesteur existant sont examinés. D'autres expérimentations, principalement sur l'utilisation du biogaz ont également été menées. Pour terminer, le travail de conception, de réalisation et d'expérimentation d'un nouveau prototype de biodigesteur, fort des nouvelles connaissances, ainsi que d'un premier prototype de système de stockage seront détaillés.

6.1. OBJECTIFS

Pour resituer le débat, nous présenterons les objectifs poursuivis par le CEAS Burkina dans le projet de développement d'un biodigesteur domestique. Ensuite, les objectifs concrets du travail réalisé lors du stage seront exposés.

6.1.1. Objectifs poursuivis par le CEAS Burkina

Le développement d'une unité de biométhanisation domestique au sein du CEAS Burkina s'inscrit également dans le cadre du projet Energy For Life. Le but initial était de développer des unités plus petites, plus faciles à construire que celles du PNB-Bf, avec des matériaux moins coûteux ou plus accessibles, demandant moins de compétences, et anticipativement nous pourrions dire en surface. De cette manière, cela permettrait d'offrir un accès au biogaz aux ménages les plus pauvres (qui ont moins d'argent à investir et moins de bétail pour l'alimentation). Pour être plus précis et en référence aux systèmes proposés, la mise au point d'une nouvelle technologie offrirait également une alternative à la construction d'un édifice en maçonnerie assez volumineux.

L'unité développée se doit donc, tout comme les autres digesteurs, d'être robuste, fiable et simple d'utilisation. En plus de cela, le CEAS Burkina accorde une importance particulière au

coût et à l'encombrement du digesteur. Il est primordial que le digesteur soit bon marché et compact afin de pouvoir être installé n'importe où.

6.1.2. Objectifs du présent travail de fin d'études

L'objectif de ce travail au sein du CEAS Burkina était la poursuite du développement de l'unité de biométhanisation domestique qui avait débuté l'an passé. En pratique, cet objectif global s'est décliné en 4 points concrets.

Le premier aspect est de quantifier la capacité de production de biogaz des systèmes développés au CEAS Burkina. En effet, bien que les unités soient fonctionnelles, jusque-là aucune mesure de la production n'avait été effectuée. Cet objectif a été réalisé grâce à la poursuite des expérimentations des digesteurs.

Le deuxième objectif était de pouvoir, sur base de la capacité de production, définir l'usage qui peut être fait des biodigesteurs domestiques du CEAS Burkina. Pour ce faire, des essais de cuissons et d'éclairage ont été réalisés afin de déterminer la consommation en biogaz de chaque usage. Ces mesures expérimentales ont ensuite été comparées aux données empiriques proposées par la littérature.

Troisièmement, il restait quelques améliorations à apporter aux unités existantes. Celles-ci concernaient principalement l'utilisation des digesteurs. Bien qu'opérationnelles, les unités restaient difficiles à alimenter et à vider. Il fallait donc pallier ces problèmes afin d'obtenir un prototype réellement reproductible sur le terrain.

Le dernier point concerne un autre aspect du biogaz à savoir le stockage. Le volume de gaz dans les barriques ne permet qu'un stockage très limité de la production de gaz. Or, la question du stockage est primordiale afin de pouvoir décaler la production et la consommation. Le dernier aspect du travail était donc la conception d'un système de stockage pour le biogaz.

6.2. EXPÉRIMENTATION DU RÉACTEUR EXISTANT

Lors du début du travail au CEAS Burkina, les deux unités de biométhanisation présentes sur le site étaient en fonctionnement. La première unité était celle réalisée à la fin du stage de Nicolas Zimmermann (voir Figure 10, p. 16). Elle est constituée de 5 fûts assemblés l'un



derrière l'autre. Cependant, les soucis d'étanchéité ont poussé l'équipe du CEAS Burkina à passer le dispositif en fonctionnement *batch*. Pour ce faire, l'entrée et la sortie du réacteur ont été condamnées à l'aide de bouchons. La deuxième unité présente la même configuration et le même fonctionnement que la première (voir Figure 16). Seule sa dimension diffère car elle est constituée uniquement de 2 fûts.



Figure 16 : Digesteur à 2 fût réalisé par le CEAS Burkina

6.2.1. Travail préparatoire

Après la fin des expérimentations en cours, le choix a été fait d'arrêter les essais sur le digesteur à 2 fûts afin de laisser la place au nouveau digesteur. En effet, vu son petit volume et son fonctionnement batch, la suite des expérimentations ne nous a pas semblé pertinente étant donné que le projet s'orientait vers des systèmes continus d'un volume total (digesteur + stockage) d'au moins 1 m³.

Le digesteur à 5 fûts a quant à lui été modifié afin que son fonctionnement puisse à nouveau être continu, ce qui paraît indispensable pour une utilisation continue du gaz produit. Des vannes ont été remises en entrée et en sortie et l'entonnoir d'alimentation a été remonté (voir Figure 17). Le mastic a également été entièrement revu car des fissures étaient apparues.



Figure 17 : Système d'alimentation du digesteur à 5 fûts

Après avoir été remis en état, un test d'étanchéité a été effectué afin de s'assurer que le digesteur était opérationnel. À partir de là, une nouvelle série d'expérimentations a débuté.

6.2.2. Expérimentation de l'unité existante

6.2.2.1. Conditions d'expérimentation

Pour poursuivre les expérimentations, le choix a été fait d'utiliser le même substrat, à savoir de la bouse de vache. Cependant, cette fois, nous avons opté pour un rapport de dilution 2:1. Étant donné l'aspect relativement sec des bouses de vache au Burkina, nous avons augmenté la quantité d'eau ajoutée (voir point 3.5 Taux de matières sèches)⁴⁴.

Au lancement du digesteur, ce sont 250 kg de substrat (soit 80 kg de bouse et 170 kg d'eau) qui ont été introduits dans ce dernier. Nous pouvons considérer que le digestat de l'expérience précédente resté sur les parois a joué le rôle d'inoculateur. Aucune mesure n'a été prise pour tenter d'évacuer l'oxygène présent dans le réacteur.

Le but de l'expérience réalisée est d'expérimenter le réacteur à 5 fûts en régime semi-continu. Des recharges ont donc été effectuées toutes les semaines à partir du 25^{ème} jour de digestion. La quantité de matière évacuée et introduite lors d'une recharge a été calculée de manière à

⁴⁴ Remarque : idéalement, il aurait fallu déterminer le taux de matière sèche contenu dans la bouse afin de calculer le facteur de dilution.

ce que en 30 jours l'ensemble de la matière contenue dans le digesteur soit remplacée (soit 60 kg de substrat par recharge dans notre cas).

6.2.2.2. Résultats de l'expérimentation

Le travail préparatoire ayant été réalisé au tout début du stage, les expérimentations du digesteur ont pu débuter dès le 22 février 2018. C'est la première fois que ce digesteur était expérimenté de manière semi-continue. Nous avons donc réalisé un suivi du fonctionnement et de la production afin d'étudier le comportement du digesteur et d'obtenir ses performances.

Pour réaliser le suivi, le CEAS Burkina possède un analyseur de gaz. Celui-ci avait déjà servi à Nicolas Zimmermann lors de son stage⁴⁵. Cet appareil permet de mesurer la concentration en CH₄, en CO₂, en H₂S et en O₂ du gaz qui est prélevé. Des relevés ont donc été réalisés le plus fréquemment possible afin de suivre les variations de la composition du biogaz produit tout au long de la période d'expérimentation. Le graphique suivant reprend l'ensemble des mesures effectuées.

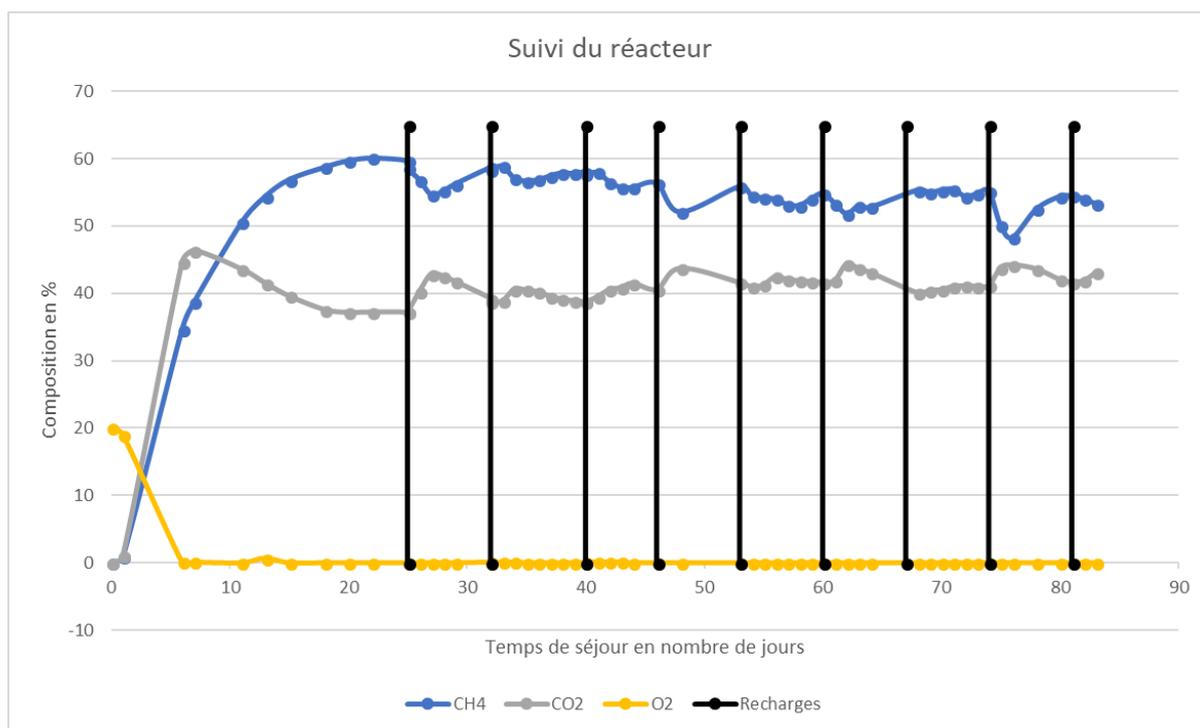


Figure 18 : Suivi de la composition du gaz du digesteur à 5 fûts

⁴⁵ Pour plus d'informations sur cet appareil de mesure se référer au TFE de Nicolas Zimmermann [Réf. 25].

Le premier constat que l'on peut effectuer sur ce graphique est que le démarrage du digesteur s'est fait de manière très rapide. Après seulement 11 jours la concentration en méthane avait déjà atteint 50% et il ne lui a fallu que 20 jours pour atteindre son maximum soit 60%. Cela est probablement dû au fait que le digesteur avait déjà été utilisé et qu'il était donc bien inoculé.

À partir du 25^{ème} jour, nous avons procédé à un remplacement d'une partie du substrat chaque semaine. De cette manière, le fonctionnement du digesteur s'est fait en semi-continu. Les différentes recharges sont représentées par les traits verticaux sur le graphique. Nous observons que la concentration de CH₄ diminue puis remonte entre chaque recharge et que celle du CO₂ fait exactement l'inverse.

Selon nous, lors de l'alimentation, un peu d'oxygène pénètre dans le digesteur (principalement contenu dans le substrat et en moindre quantité par une légère entrée d'air). La bouse qui vient d'être introduite représente un quart du volume total. Celle-ci commence par produire du CO₂ avant d'être totalement inoculée par des microorganismes anaérobies. Cela explique que dans un premier temps la production de CO₂ augmente au détriment de celle de CH₄ et que la situation se rétablit rapidement dans les jours qui suivent.

La diminution de CH₄ n'est pas toujours de la même importance. Cela est directement lié à l'attention que l'on apporte à éviter les entrées d'air lors des alimentations. Par exemple, la 8^{ème} alimentation ne s'était pas bien passée car une dépression s'est créée au sein du digesteur, ce qui a aspiré de l'air lors de l'ouverture de la vanne d'alimentation. Cette erreur de manipulation se remarque très clairement sur le graphique (voir la chute de la courbe bleue à droite sur la Figure 18).

Malgré ces variations de composition (qui peuvent atteindre 5% au cours d'une semaine), le taux de méthane reste supérieur à 50%⁴⁶ tout au long de l'expérimentation qui a duré près de 3 mois. Le fonctionnement en semi-continu est donc un succès du point de vue de la qualité du gaz produit.

Le second paramètre à regarder est quant à lui quantitatif et est représentatif des performances du digesteur. Il s'agit de la production de gaz. Pour évaluer celle-ci, nous

⁴⁶ Mis à part après la 8^{ème} recharge lors de laquelle une quantité plus importante d'air s'est introduite dans le digesteur.



sommes partis des mesures de la pression interne du digesteur. Grâce à celle-ci, à la température et à la loi des gaz parfaits, il nous est possible de déterminer le volume de gaz produit sur une période donnée⁴⁷.

$$Production = V_{normal\ final} - V_{normal\ initial}$$

La production a été évaluée tout au long de l'expérimentation. Les résultats sont repris à figure suivante.

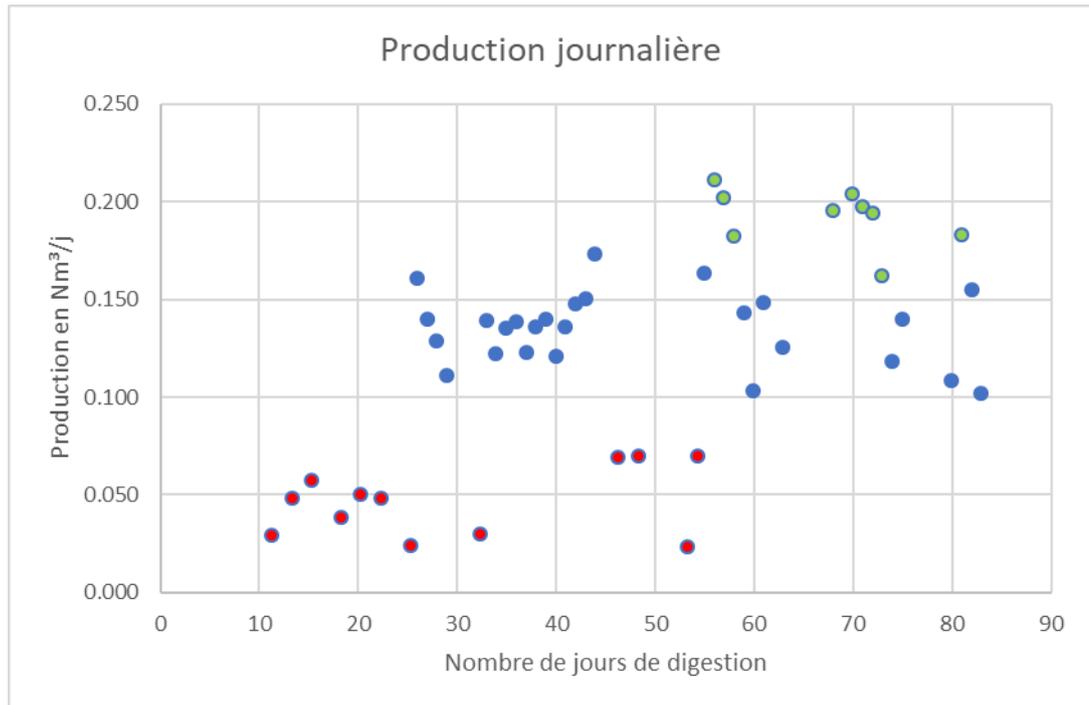


Figure 19 : Production de biogaz du digesteur à 5 fûts en Nm³

Lors de nos relevés, nous nous sommes aperçus que la production de gaz mesurée variait énormément en fonction de la fréquence des mesures. Cela s'explique par le fait que la pression du digesteur ne dépasse jamais les 240 mbars. À cette pression, les pertes et la production se compensent. Or, après 24h le digesteur atteint déjà des pressions proches de cette limite. Donc les volumes de production mesurés après 1 jour ou après 2 jours sont quasi identiques car la production du 2^{ème} jour est en grande partie perdue. Ainsi, il est indispensable de déterminer la production et de vider le digesteur quotidiennement pour que la mesure donne une image correcte de la production.

⁴⁷ Ce calcul est possible car le volume du réacteur est constant.



Après avoir constaté cela, nous avons en toute logique écarté toutes les mesures de production qui avaient été faites sur plusieurs jours (points rouges sur le graphique). Nous avons également tenté, quand cela était possible, de vidanger la production de gaz 2 fois par jour afin d'éviter au maximum les pertes (qui croissent de manière exponentielle avec la pression). Les mesures prises dans ces conditions sont représentées en vert sur le graphique. On considère que ces points sont plus représentatifs de la production étant donné qu'ils sont moins influencés par les pertes.

En ne considérant que les mesures valables (points bleus et verts), la production moyenne du biogaz est de 0,150 Nm³/j. Si par contre on ne tient compte que des points verts, la production moyenne est de 0,187 Nm³/j. Dans tous les cas, le graphique indique clairement que la production est comprise entre 100 et 200 litres par jour. Il est toutefois important de garder à l'esprit que cette production n'est pas la production finale du digesteur en régime stationnaire. En effet, le lancement d'un digesteur continu peut durer jusqu'à 4 mois. Avant ce délai, la production est toujours plus importante que la production en régime stationnaire. Malheureusement, le stage n'a pas duré assez longtemps que pour arriver dans cette phase. Nous avons donc calculé la production maximale que ce biodigesteur peut atteindre à partir du potentiel méthanogène de la bouse de vache (40 litres de gaz par kg de bouse).

$$Production = \frac{Masse\ de\ bouse * Potentiel\ méthanogène}{Temps\ de\ séjour}$$

$$Production = \frac{80 * 40}{30} = 106\ L/j$$

De toutes les façons, cette production est relativement faible. Cela vient principalement du fait que le volume du digesteur n'est pas entièrement utilisé. Seul un quart du volume contient du substrat (soit 250 litres). Pour augmenter la production, il faut nécessairement augmenter le taux de remplissage du digesteur ce qui est impossible dans cette configuration car en position horizontale les barriques ne sont pas suffisamment solides.

6.2.3. Estimation du prix

Le prix fait partie des critères fondamentaux pour la conception d'un biodigesteur. Puisque les digesteurs domestiques sont destinés aux populations rurales les plus pauvres, il est



indispensable que son prix soit faible. C'est pour évaluer ce critère qu'une estimation du prix de chaque prototype développé au CEAS Burkina a été réalisée.

Bien que la construction du digesteur horizontal à 5 fûts n'ait pas fait partie du présent travail, il est tout de même essentiel de connaître son coût. Une estimation a donc été effectuée avec l'aide des membres du CEAS Burkina. Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des éléments nécessaires à la construction de ce digesteur ainsi que leur prix.

Description	P.U. [Fr. CFA]	Quantité	Unité	Total [Fr. CFA]
Barrique métallique 200 litres	11000	5	pc.	55000
Système d'alimentation	3000	1	pc.	3000
Vanne 3/4"	2500	1	pc.	2500
Réducteur 3/4" - 1/2"	200	2	pc.	400
Mamelon 1/2"	200	2	pc.	400
Brasage du cuivre sur la vanne	1000	2	pc.	2000
Téflon	500	1	pc.	500
Collier de serrage (20mm)	100	5	pc.	500
Tuyau gaz (8mm)	1500	1	m	1500
Baguettes à souder	2000	1	bt.	2000
Disque à couper	1500	1	pc.	1500
Vanne 3"	25000	1	pc.	25000
Vanne 2"1/2	20000	1	pc.	20000
Passe cloison 3"	4000	2	pc.	8000
Mamelon 3"	5000	2	pc.	10000
Réducteur 3" 2"1/2	3000	1	pc.	3000
Mastiquage	15000	1	pc.	15000
Support	10000	1	pc.	10000
Total				160300

Table 3 : Liste du matériel pour la construction du digesteur horizontal à 5 fûts

Le prix total du digesteur existant est de 160 300 Fr. CFA, soit environ 245 €. Ce montant équivaut à la moitié du prix du plus petit digesteur du PNB-Bf (hors subside). Or, il faut garder en mémoire que le digesteur dont il est question ici est 4 fois plus petit que ce dernier et que sa production est 5 fois moindre (voir le point précédent).

L'achat des barriques représente 34% du total. Celles-ci sont indispensables et il est normal qu'elles constituent une part importante du prix. Pour réduire le coût du digesteur, il faut chercher à diminuer les frais liés à l'équipement de ces fûts. Par exemple, l'achat des vannes d'entrée et de sortie et des accessoires de plomberie qui les accompagnent représente 41% du montant total. Ce poste de dépense est clairement trop onéreux et se doit d'être réduit.

6.2.4. Remarques, observations et interprétations

À la suite de l'expérimentation du digesteur à 5 fûts, nous pouvons mettre en évidence les aspects importants que celle-ci nous a révélés.

Tout d'abord, nous constatons que la mise en continu du réacteur est un succès. Grâce à cela, la production est continue et la qualité du gaz produit est largement suffisante pour qu'il soit utilisable.

Par contre, les performances de ces digesteurs sont médiocres et la quantité de gaz qu'ils permettent de produire reste trop faible. Cela est premièrement lié au taux réduit de remplissage des cuves. En effet, comme cela a été précisé, vu la fragilité des fûts en position horizontale, seul un quart du volume total peut contenir du substrat. Cela engendre que seul un quart du volume est réellement utile à la méthanisation. Deuxièmement, nous avons constaté que la production est difficile à récupérer. Si le gaz n'est pas vidé régulièrement, une grande partie de la production est perdue par un débit de fuite qui augmente avec la pression interne.

Pour finir, ce digesteur n'est pas simple d'utilisation. La vidange doit se faire accroupi sous le digesteur alors que l'alimentation doit se faire sur une escabelle. Les sections de passage réduites des vannes ajoutent une difficulté supplémentaire à ces opérations. Il est également difficile d'éviter l'entrée d'air dans le digesteur au moment du remplissage.

En résumé, ce digesteur est relativement cher, peu performant et compliqué à faire fonctionner. La configuration même du digesteur est à l'origine de certains de ses défauts. Dès lors, nous avons décidé de ne pas améliorer ce digesteur mais de revoir entièrement la conception de base compte tenu des constatations faites. Cette démarche est présentée au point 6.4.

6.3. ESSAIS DE CUISSON ET D'ÉCLAIRAGE

Bien que la littérature nous renseigne sur les consommations moyennes d'un bec de cuisson et d'une lampe au biogaz, nous avons voulu au CEAS Burkina mener des expériences afin de vérifier et de préciser celles-ci. L'objectif est de déterminer la consommation en biogaz pour la préparation des plats les plus consommés au Burkina Faso et pour l'éclairage. De cette



manière, nous serons en mesure de définir ce que la production des unités développées au CEAS Burkina permet de faire. Le but final étant de pouvoir déterminer le nombre d'heures d'éclairage et le nombre de repas qu'il est possible de réaliser avec une production donnée.

6.3.1. Mode opératoire

Le principe des expériences réalisées est assez simple. Le but étant de déterminer la consommation de biogaz lors des utilisations domestiques de celui-ci, nous avons reproduit au CEAS Burkina les conditions de ces utilisations tout en effectuant les mesures adéquates. Ainsi, une personne est venue cuisiner une série de plats consommés au Burkina Faso en utilisant la production de biogaz des digesteurs présents au centre (voir Figure 20). Nous avons également réalisé des essais d'éclairage à l'aide d'une lampe à biogaz identique à celles utilisées dans les villages.



Figure 20 : Essai de cuisson au biogaz

Lors de ces utilisations du biogaz, il faut déterminer la quantité de gaz consommée. L'idée pour cela est de disposer d'un compteur afin de réaliser une mesure précise de la consommation ainsi que du débit de gaz lors des différentes utilisations. Dans le travail de Éric Ngoga [Réf. 14] une méthode de mesure du volume de gaz utilisé est présentée. Celle-ci se fait par le biais d'un compteur à gaz domestique comme le Gallus 2000 G1,6. La fiche technique de ce compteur est disponible à l'annexe 12.2. Ce type de compteur peut également être muni d'un émetteur d'impulsions afin d'informatiser le relevé des mesures.

Malheureusement, le CEAS Burkina ne possède pas ce type de compteur. Nous avons donc dû être inventif afin de mettre au point une méthode de mesure artisanale avec le matériel à

notre disposition. Le gaz étant initialement stocké dans des chambres à air, nous avons décidé de mesurer celles-ci afin d'estimer les volumes de gaz produits et consommés (voir Figure 21). Ces volumes mesurés sont ensuite ramenés en volumes normaux afin qu'ils soient indépendants de la température et de la pression.



Figure 21 : Mesure des chambres à air contenant la production de biogaz

Lorsque les chambres à air sont vides, le volume restant ne peut être déterminé via des mesures. Pour estimer celui-ci, nous avons inséré les chambres à air dans un récipient dont nous connaissons le volume à savoir un seau de 20 litres (voir Figure 22). Nous estimons que le volume qui sort du seau est équivalent aux espaces restants dans le seau. Ainsi le volume des deux chambres à air une fois vidées normalement serait de 20 litres. Bien sûr nous sommes conscients que cette estimation n'est pas très précise. C'est pourquoi nous avons tenu compte d'une erreur de 5 litres sur cette mesure dans le calcul d'erreur.



Figure 22 : Estimation du volume des chambres à air vides

Pour déterminer la fiabilité de nos résultats, nous avons réalisé un calcul d'erreur sur la méthode utilisée pour quantifier la production. Celui-ci est disponible à l'annexe 12.3. Le calcul d'erreur a été introduit dans nos tableaux de résultats et a ainsi été estimé pour chaque mesure. De manière générale, l'erreur relative moyenne sur le volume de gaz calculé est de 6% (soit environ 23 litres en absolu) ce qui nous a semblé acceptable.

Lors des essais de cuisson et d'éclairage, nous avons donc procédé à une détermination du volume de gaz consommé en suivant la méthode décrite ci-dessus. À celui-ci s'ajoute une mesure de la durée des essais. De cette manière, il est possible d'estimer les débits (ou les consommations horaires) des différentes applications rurales du biogaz.

6.3.2. Résultats des expérimentations

6.3.2.1. Résultats des essais de cuisson

Au total lors du stage, nous avons pu réaliser 8 essais de cuisson. Les plats qui ont été préparés sont les repas les plus consommés au Burkina Faso. Nous pouvons citer entre autres le t^ô, le riz gras, le riz sauce, les spaghettis, le couscous et les ragoûts. Les résultats des différentes expérimentations sont repris dans la Table 4.

N°	Description du plat préparé	Quantité*	Nombre de personnes	Temps de préparation total**	Conso. Biogaz*** [N litres]	Débit [N litres/h]
1	Riz sauce tomate	500 g	4	50 min	273	327.6
2	Ragoût de pommes de terre aux légumes	1 kg	5	50 min	247	296.4
3	Riz gras au poisson	1 kg	6	3h	750	250.0
4	Riz sauce arachides avec viande et choux	1 kg	6	1h30	622	414.7
5	Tô sauce feuille	1 kg	6	3h30	770	228.6
6	Ragoût d'igname aux légumes et viande	3 kg	7	2h	720	360.0
7	Spaghettis gras avec viande	3 kg	7	2h	690	345.0
8	Couscous sauce yassa avec viande	2 kg	10	3h15	800	246.2
	Consommation moyenne					308.5
	Consommation maximum					414.7
	Consommation minimum					228.6
	* Poids des féculent uniquement.					
	** Temps total si tout était préparé sur 1 bec de cuisson (différent du temps réel).					
	*** Les valeurs en vert ont été mesurées, les valeurs en rouge sont des extrapolations sur base d'une mesure.					

Table 4 : Résultats des essais de cuisson

Nous pouvons remarquer que le temps de préparation est très variable. Nous avons réalisé les deux premiers essais nous-mêmes. La cuisine était donc simple et rapide. Les plats suivants ont été préparés par une cuisinière. Ces préparations étaient donc plus sophistiquées ce qui explique la durée de cuisson importante. Sur le terrain, dans les villages la cuisine n'est pas aussi chronophage. Les expériences qui ont atteint 3 heures de temps constituent donc les cas extrêmes et non une cuisine quotidienne. Toutefois, cette diversité de préparation nous a permis d'étudier de nombreux cas distincts.

La consommation moyenne de biogaz est de 308 litres normaux par heure de cuisson. Celle-ci est comprise entre un maximum de consommation de 414 litres normaux et un minimum de 228 litres normaux. Ces valeurs correspondent parfaitement avec la littérature. Cette dernière nous informe qu'un bec de cuisson domestique au biogaz consomme entre 200 et 450 litres par heure en fonction du débit⁴⁸.

Lors de nos essais, nous avons constaté que le débit était difficile à régler. Celui-ci est principalement déterminé par la pression au sein des chambres à air. De ce fait, lorsque les chambres à air se vident, le débit de gaz s'affaiblit, ce qui pose problème si la cuisson nécessite une flamme puissante. Cet aspect de l'utilisation du gaz devra être pris en compte dans la conception du système de stockage (voir point 6.5), il faudra faire en sorte que la pression de

⁴⁸ Source : Réf. 22.



sortie du gaz soit la plus constante possible. La littérature nous informe que la pression de sortie pour le bon fonctionnement d'un foyer au biogaz doit être au minimum de 30 mbars⁴⁹.

6.3.2.2. Résultats des essais d'éclairage

Les essais d'éclairage ont été réalisés à l'aide d'une lampe à biogaz comme celles utilisées dans les villages (voir Figure 23). Ces lampes s'achètent principalement chez les vendeurs d'accessoires pour le biogaz (voir 5.4 Les activités du Programme National).



Figure 23 : Lampe à biogaz

Le principale paramètre qui fait varier la consommation d'une lampe au biogaz est la pression de sortie du gaz. En effet, celle-ci conditionne le débit. Plus celui-ci est important, plus la puissance d'éclairage de la lampe est importante et plus elle consomme alors de biogaz. Lors de l'expérimentation, nous avons donc réalisé des essais à différentes pressions de sortie du gaz. Les résultats de ces expériences sont donnés dans le tableau suivant.

N°	Pression moyenne de sortie du gaz [mbars]	Durée d'éclairage [h]	Conso. Biogaz [N litres]	Débit [Nlitres/h]
1	50	1	38	38.0
2	40	1	38	38.0
3	30	1	27	27.0

Table 5 : Résultats des essais d'éclairage

⁴⁹ Source : Réf. 20.

La pression moyenne au cours d'une heure d'utilisation peut difficilement dépasser 50 mbars étant donné que la pression maximale de stockage est de 60 mbars. Nous avons réalisé les essais à partir des chambres à air pleines et avons effectué des mesures toutes les heures en calculant la pression moyenne de sortie. Nous obtenons des consommations aux alentours de 40 normaux litres par heure pour l'utilisation de la lampe. La dernière mesure (à 30 mbars) donne une consommation de gaz inférieure. Cependant, l'intensité lumineuse de la lampe était également moindre. Nous avons constaté que 25 mbars était la pression de sortie minimale nécessaire pour maintenir la lampe allumée.

La littérature, quant à elle, indique qu'une lampe au biogaz identique à celle utilisée consomme entre 100 et 150 litres par heure de fonctionnement⁵⁰. Elle indique également que la pression d'utilisation pour un bon fonctionnement d'une telle lampe est comprise entre 75 et 150 mbars (ce qui explique la différence de consommation). En dessous de 75 mbars, la luminosité est considérée comme insuffisante (ce que nous avons constaté lors de nos essais). Par contre le fonctionnement optimal est atteint à 150 mbars. Dans ce cas le flux lumineux émis par la lampe est de 400 à 500 lumens, ce qui équivaut à une ampoule à incandescence de 60 à 70 W.

Nous constatons donc que la pression maximale de stockage (qui correspond à la pression de sortie maximale du digesteur modulable – voir plus loin) est insuffisante pour assurer le bon fonctionnement d'une lampe. Certes, celle-ci s'allume mais l'intensité d'éclairage est faible. En l'absence d'un système efficace pour augmenter la pression, l'utilisation d'une lampe à partir de la technologie développée au CEAS Burkina semble compromise sans une amélioration du système qui permettrait d'atteindre des pressions suffisantes.

6.4. CONCEPTION D'UN NOUVEAU DIGESTEUR

Le digesteur de 5 fûts existant, bien que fonctionnel, présente quelques problèmes surtout au niveau de son utilisation. De plus, celui-ci n'est pas très ergonomique. L'alimentation et l'évacuation sont salissantes et chronophages. En outre, la cuve étant fermée à l'aide de vannes, la pression augmente rapidement au fil de la digestion. Cela pose un problème de

⁵⁰ Source : Réf. 22.

sécurité. Pour finir, la construction d'un tel digesteur pose quelques difficultés quant à l'assemblage des fûts et clairement à la réalisation de l'étanchéité. Un masticage est plus que nécessaire, et pas toujours suffisant. Or celui-ci est cassant et doit être refait après une manipulation du digesteur ou lorsque le temps a fait son travail de sape.

Après mûres réflexions, nous sommes arrivés à la conclusion que la manière la plus simple de résoudre l'ensemble des problèmes était de revoir la conception. C'est à partir de là qu'un nouveau modèle de digesteur (toujours sur base de fûts métalliques) a été imaginé en tenant compte de l'ensemble des précédents essais et de la connaissance acquise grâce à l'investigation et via les échanges, notamment ceux avec la SNV.

6.4.1. Conception

Trouver un nouveau concept fonctionnel et sans les défauts du précédent ne fut pas chose aisée. Pour ce faire, nous sommes tout d'abord partis des constats effectués lors de l'expérimentation du digesteur à 5 fûts existant.

Ce dernier est constitué de fûts utilisés à l'horizontale (légèrement inclinés). Nous avons constaté que dans cette configuration, l'assemblage des fûts est fragile. Une trop grosse charge les déforme aisément sans compter les défaillances du mastic qui vont de pair. Il nous a donc semblé judicieux d'utiliser les fûts exclusivement en position verticale.

Deuxièmement, nous nous sommes rendus compte que l'utilisation de vannes engendre une série de contraintes. Tout d'abord, ce sont elles qui limitent la section de passage vu l'augmentation rapide de leur prix en fonction de leur dimension. Ensuite, ce sont des pièces mécaniques sujettes à un encrassement. Elles deviennent difficiles à actionner une fois que du substrat a séché à l'intérieur. Pour finir, les vannes ferment totalement le volume du digesteur ce qui provoque une montée en pression très rapide lorsque la production est importante⁵¹. À un certain niveau, celle-ci peut s'avérer dangereuse. Réussir à concevoir un digesteur sans vanne éviterait donc un certain nombre d'ennuis.

À partir de là, nous nous sommes rappelés le fonctionnement ingénieux des digesteurs enterrés à dôme fixe proposés par le PNB-Bf. Justement, ceux-ci ne possèdent pas de vanne.

⁵¹ Remarque : ce point peut-être à la fois un avantage et un inconvénient. Une pression importante est intéressante pour le stockage et l'utilisation mais augmente les fuites du digesteur.



L'idée nous est alors venue de tenter d'adapter ce principe de fonctionnement à un digesteur constitué de fûts métalliques. Pour concrétiser cette idée un premier concept a vu le jour (voir Figure 24).

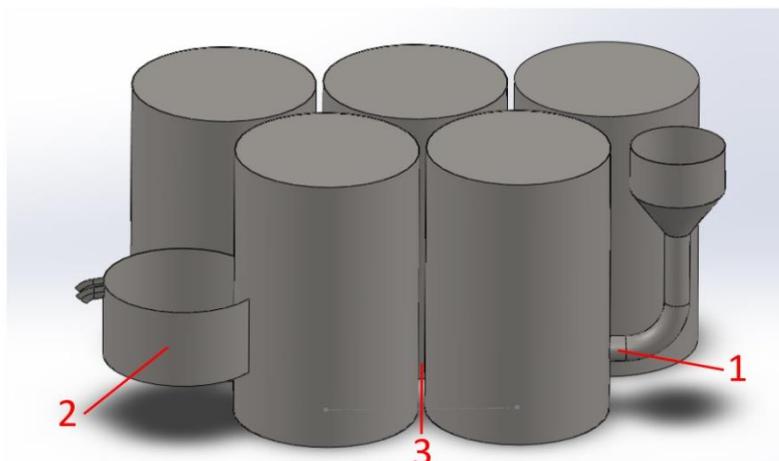


Figure 24 : Premier projet de nouveau digesteur

Le digesteur se veut très simple. Il est constitué de 5 fûts posés l'un à côté de l'autre et reliés par un tuyau d'acier soudé dans le bas. Pour l'alimentation, l'idée de l'entonnoir a été conservée mais cette fois elle se fait dans le bas du digesteur (point 1 sur la Figure 24). De cette manière, la sortie du tuyau est constamment immergée et l'air ne peut pénétrer à l'intérieur du digesteur malgré l'absence de vanne. Pour l'évacuation, nous avons tout d'abord imaginé un petit bassin à débordement soudé sur la dernière barrique (voir point 2 sur la Figure 24).

Très vite nous avons constaté des inconvénients à cette première idée. Tout d'abord, le système est relativement encombrant et le transport nécessitera un gros véhicule⁵². De plus, les soudures au niveau des tuyaux qui joignent les cuves semblent difficiles à réaliser et nécessiteront un espacement plus important entre les cuves (voir point 3 sur la Figure 24).

Ce dernier constat nous a poussé à imaginer un digesteur démontable au niveau des tuyaux de liaisons. De cette manière, la fabrication et le transport seront plus simples. Et pour aller encore plus loin, nous avons adapté la configuration afin que toutes les cuves intermédiaires

⁵² Impossible à charger sur les pickups dont le CEAS Burkina se sert pour l'ensemble de ses missions.

soient identiques et que le digesteur devienne modulable. Les cuves intermédiaires pourront donc être interchangeables ou remplacées si certaines sont usées. De plus, la taille du digesteur peut être adaptée en fonction des situations car le nombre de cuves peut varier. Notre nouveau concept était né et nous l'avons baptisé « digesteur modulable » (représenté à la figure ci-dessous).

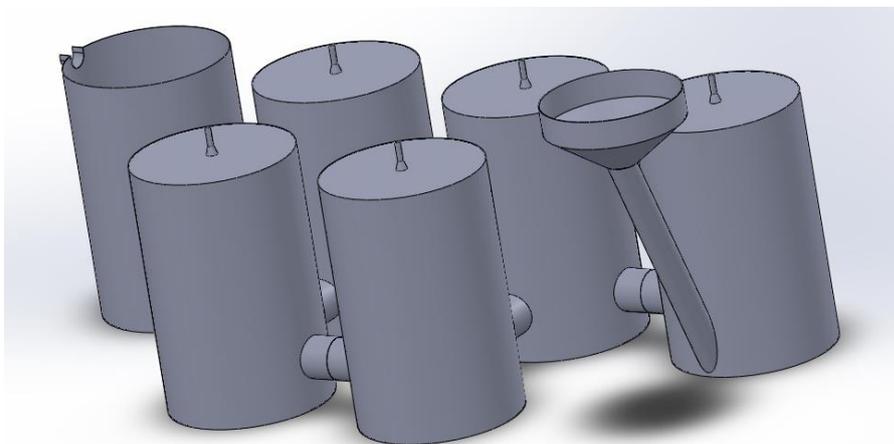


Figure 25 : Modèle 3D du digesteur modulable

Comme on peut le constater sur la Figure 25, d'autres changements ont eu lieu depuis le premier projet. Le système d'alimentation a été légèrement modifié. Il a été décidé de supprimer le coude et de souder l'entonnoir à l'aide d'un tuyau incliné afin de pouvoir y insérer une barre métallique en cas d'obstruction. Cette idée a été reprise du tout premier digesteur construit au CEAS Burkina avant l'arrivée de Nicolas Zimmermann.

L'autre gros changement est le bassin d'évacuation. Dans le système présenté ci-dessus tout comme dans les digesteurs à dôme fixe, c'est la colonne de substrat dans le bassin de sortie qui crée la pression au sein du digesteur. Or dans le premier projet du nouveau digesteur (Figure 24), le bassin aurait débordé directement car sa hauteur était très faible. Voulant travailler avec des fûts, la hauteur maximale dont nous disposons est de 0,9 m. Il faut donc tenter de maximiser la différence de niveaux entre le niveau du bassin d'évacuation (auss appelé bassin de compensation) et le niveau au sein du digesteur. Nous avons donc choisi de nous servir d'un fût supplémentaire pour avoir un bassin de compensation d'une hauteur et d'un volume suffisant. La figure suivante donne un schéma général du digesteur modulable.

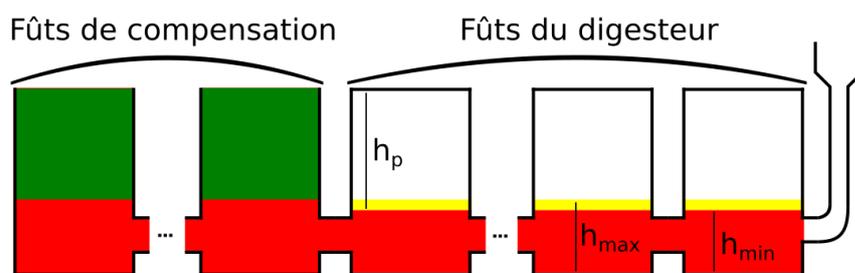


Figure 26 : Schéma du digesteur modulaire

L'ensemble du dimensionnement du système est basé sur les différents niveaux. Le but est de maximiser la différence de niveaux (h_p sur la Figure 26) afin d'obtenir une pression suffisante dans le réacteur pour l'utilisation et le stockage du gaz. Parallèlement, il faut tenter de maximiser le remplissage des fûts afin d'augmenter la production de gaz. Il y a donc un compromis à trouver.

Lorsque la pression interne du digesteur est égale à la pression atmosphérique, les niveaux sont équilibrés dans l'ensemble des barriques. Lorsque la pression interne du digesteur augmente, le niveau au sein de celui-ci diminue et le niveau dans le (ou les) fût(s) de compensation augmente. Les volumes représentés en jaune et en vert sur la figure ci-dessus doivent donc être égaux.

Le niveau minimum à l'intérieur des fûts de digestion est défini par la hauteur des tuyaux de jonction. Il ne peut jamais descendre en dessous sous peine de voir la production s'échapper par ce même tuyau. Les tuyaux de jonction des barriques doivent cependant être placés le plus haut possible afin d'augmenter le rapport SRT/HRT. Comme expliqué au point 3.6, la matière organique se dépose principalement dans le fond du digesteur. Il est donc souhaitable de retenir celle-ci plus longtemps et de permettre aux phases supérieures d'être évacuées. Il y a donc à nouveau un compromis à trouver.

Pour la réalisation du premier prototype, nous avons fait le choix de construire un digesteur dont le volume total est de 1 m^3 (volume utile de digestion + volume de gaz), c'est-à-dire composé de 5 barriques. De cette manière, le volume est identique à celui du digesteur existant ce qui permet les comparer aisément. Sur base de ce choix, un dimensionnement rigoureux a été effectué afin que le digesteur soit fonctionnel tout en présentant une production maximale. Le dimensionnement est disponible en annexe 12.4.

6.4.2. Réalisation de l'unité

Au cours du mois de mars, nous avons entrepris la construction du premier prototype de digesteur modulaire. Pour ce faire, chaque fût est préparé séparément. Cela facilite énormément la construction et permet à plusieurs ouvriers de travailler en parallèle sur différentes cuves.

La fabrication est réellement très simple. Il suffit de découper les ouvertures adéquates et d'y souder la tuyauterie (voir Figure 27). La seule difficulté notable est la complexité de la soudure due à l'épaisseur extrêmement faible des parois des barriques. Pour remédier à cela, un anneau métallique est ajouté dans l'assemblage en guise de métal d'apport.



Figure 27 : Préparation d'un des fûts du digesteur modulaire

Pour ce qui est de la sortie du gaz, un morceau de tuyau de cuivre est brasé dans le bouchon du fût (voir Figure 28). Celui-ci permet de raccorder un tuyau souple sur la cuve afin de récupérer la production de biogaz. L'étanchéité du bouchon est assurée par du téflon.



Figure 28 : Sortie de gaz du digesteur modulable

La cuve d'alimentation et la cuve d'évacuation sont légèrement différentes mais leur construction n'est pas plus compliquée. Finalement, il n'aura fallu que 3 jours de travail pour que le prototype soit entièrement terminé. Ci-dessous à la Figure 29, on peut voir l'ensemble des cuves réalisées. Pour rappel, les plans de fabrication sont disponibles à l'annexe 12.5.



Figure 29 : Photo des différentes barriques ; respectivement barrique d'alimentation, barriques intermédiaires et barrique d'évacuation

Après la fabrication des cuves, il ne restait plus qu'à les disposer et à les raccorder afin que le digesteur soit fonctionnel. Pour que le système fonctionne correctement, il est indispensable de poser les cuves sur un sol plat et de niveau. Comme ce n'était pas le cas dans la cour du CEAS Burkina, nous avons dû placer les cuves sur un plancher improvisé afin que ces conditions soient remplies.



Figure 30 : Mise en place du digesteur modulable

Pour raccorder les fûts entre-deux, nous avons opté pour un système simple et peu coûteux. Un morceau de chambre à air est enfilé sur les 2 tuyaux à raccorder. Ceux-ci sont munis d'une petite gorge afin de serrer les chambres à air à l'aide d'un simple fil de fer (voir Figure 31). De cette manière l'étanchéité est assurée. Ainsi, en cas de problème les utilisateurs peuvent facilement démonter le système ou remplacer un raccord. Pour cela, une simple pince et un morceau de fil de fer sont requis.



Figure 31 : Dispositif de jonction de deux fûts

Un fois l'ensemble des cuves disposées et raccordées, il reste à réaliser le circuit gaz qui se fait de manière classique avec du tuyau flexible et des colliers de serrage (voir Figure 32). Un manomètre est intégré dans le circuit afin de pouvoir contrôler à tout moment la pression au sein du digesteur. Au total, une demi-journée est suffisante pour la mise en place et le raccordement du digesteur modulable.



Figure 32 : Digesteur modulable prêt pour l'expérimentation

Grâce à la rapidité de la réalisation, le digesteur modulable fut terminé le 22 mars 2018 et était prêt à être testé.

6.4.3. Expérimentation du nouveau système

6.4.3.1. Conditions d'expérimentations

Pour l'expérimentation de ce nouveau digesteur, nous avons voulu nous placer dans des conditions similaires à l'expérimentation du digesteur existant. De cette manière, la comparaison des résultats sera réellement représentative des performances intrinsèques à chacun des digesteurs. Nous avons donc utilisé le même substrat (de la bouse de vache) et le même rapport de dilution (2:1).

Au lancement du nouveau digesteur, nous avons introduit 600 kg de substrat (soit 200 kg de bouse et 400 kg d'eau). D'après les calculs de dimensionnement, la quantité de substrat pour un fonctionnement optimal est 550 kg (soit plus du double du digesteur à 5 fûts). Nous avons volontairement surchargé le digesteur afin d'expérimenter dès le démarrage l'évacuation passive du surplus. Comme le digesteur était neuf, nous avons ajouté en plus du substrat 60 kg de digestat provenant de l'autre réacteur afin de l'inoculer. À nouveau, aucune mesure n'a

été prise pour tenter d'évacuer l'oxygène présent dans le réacteur. L'introduction de la matière est toutefois une manière de chasser l'air présent initialement.

La principale différence avec le digesteur existant est que celui-ci est prévu pour un fonctionnement en continu. Nous avons donc effectué des recharges quotidiennes (5 jours par semaine) de 15 kg de substrat à partir du 8^{ème} jour de digestion. Le volume des recharges a été déterminé lors du dimensionnement (voir annexe 12.4). Une correction a été faite pour tenir compte du fait que les recharges n'ont lieu qu'en semaine étant donné que le CEAS Burkina est fermé le *week-end*. L'alimentation réelle en bouse de vache est donc de 3,6 kg par jour (soit 5 kg 5 jours sur 7).

6.4.3.2. Résultats de l'expérimentation

Tout d'abord, nous avons constaté dès le commencement de l'expérience que le digesteur modulable est plus facile à utiliser. Son remplissage a été réalisé sans encombre. Les sections de passage plus importantes facilitent l'insertion du substrat. L'évacuation quant à elle se fait naturellement et sans intervention. Nous avons observé que celle-ci s'est produite comme prévu.

Tout comme pour l'expérimentation du digesteur à 5 fûts, nous avons ici principalement suivi la composition et la quantité de gaz produit. Le graphique suivant nous montre l'évolution de la composition du gaz au cours de l'expérience.

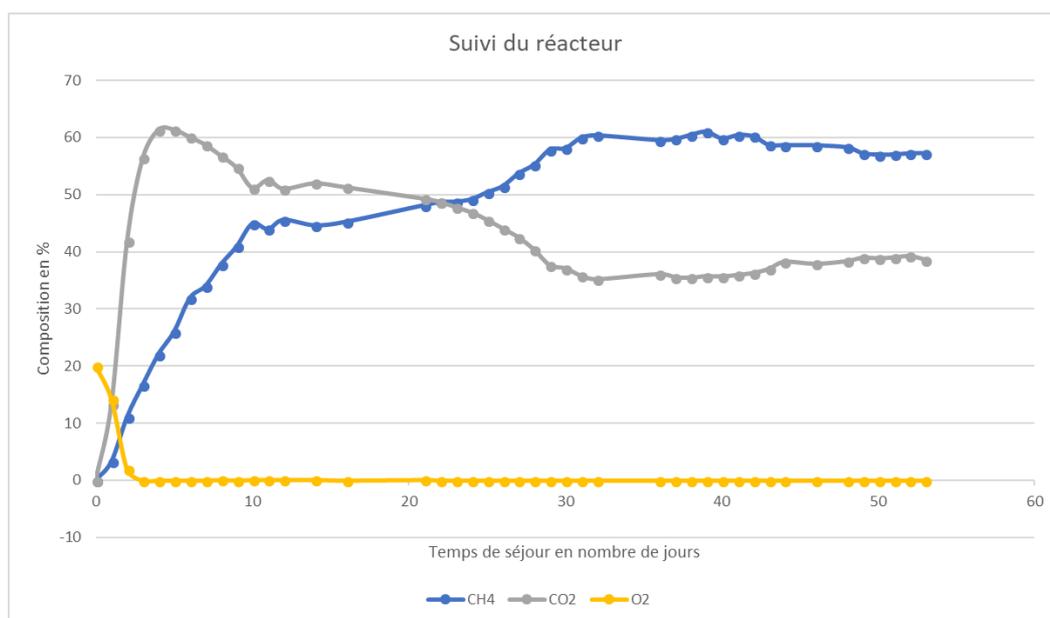


Figure 33 : Suivi de la composition du gaz du digesteur modulable

Sur ce graphique, nous constatons que l'augmentation du taux de méthane (courbe bleu) s'est pratiquement faite en 2 étapes. Il y a tout d'abord eu une augmentation « ordinaire » et à laquelle nous nous attendions au lancement du digesteur (les 10 premiers jours). Cette forte croissance suggérait un bon démarrage sans doute dû à l'inoculation à laquelle nous avons procédé. Cependant, cette croissance s'est arrêtée aux alentours de 45% de CH₄. Ce taux est ensuite resté un peu près constant pendant les 10 jours suivant puis il s'est remis à augmenter plus lentement pour finalement atteindre les 60% peu après le 30^{ème} jour.

Le ralentissement de l'augmentation est apparu quelques jours après le début de l'alimentation en continu. Le démarrage les 8 premiers jours s'est donc produit comme dans un réacteur batch. Ensuite, la matière qui avait commencé à méthaniser s'est fait progressivement remplacer par de la matière fraîche, ce qui a ralenti l'augmentation du taux de méthane.

Après environ 30 jours, nous observons que la composition du gaz se stabilise autour de 60% de méthane. Contrairement au digesteur à 5 fûts alimenté une fois par semaine, ici, la composition du biogaz ne varie quasiment plus (1,5% au maximum). Cela offre une production continue et constante (comme pour les digesteurs enterrés). Au-delà du 42^{ème} jour, nous observons une légère chute du taux de méthane qui se maintient tout de même aux alentours des 58%.

Pour quantifier la production, nous avons repris la méthode qui consiste à mesurer les chambres à air remplies avec la production, à ramener le volume calculé dans les conditions normales de pression et de température et à soustraire le volume initial des chambres à air vides (méthode décrite au point 6.3.1). Nous avons également procédé à une correction afin de tenir compte du temps réel de production. Les mesures n'ayant pas été prises chaque jour exactement à la même heure, la production calculée a été ramenée à une production sur 24 heures. La méthode étant identique, le calcul d'erreur disponible à l'annexe 12.3 est également valable pour le calcul de la production. Les résultats obtenus sont présentés à la figure suivante.



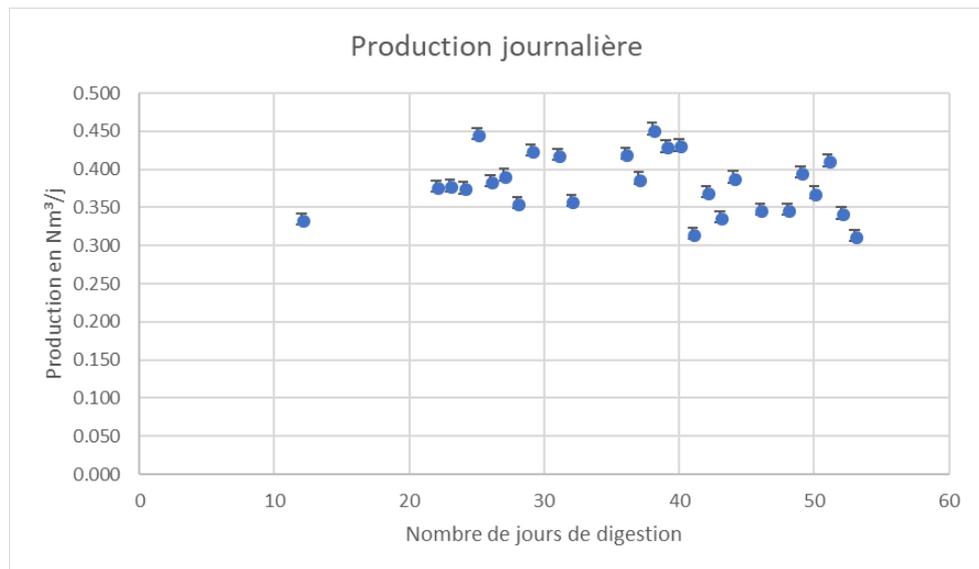


Figure 34 : Production de biogaz du digesteur modulable en Nm³

Au-delà du 20^{ème} jour, la production atteint son maximum et est comprise entre 350 et 450 L/j. La production journalière moyenne mesurée jusqu'ici est de 382 litres soit plus du double de celle du digesteur à 5 fûts. Cela s'explique par le fait que le volume utile du digesteur modulable est de 0,4 m³ à la place de 0,25. Le remplissage est plus important ce qui permet une plus grande production. De plus, l'étanchéité semble meilleure.

Encore une fois, la production mesurée n'est pas complètement représentative de la production journalière du biodigesteur en régime stationnaire. Comme déjà mentionné, le temps de démarrage d'un digesteur continu est de 3 à 4 mois. Les essais sur le digesteur modulable n'ont pu s'étendre que sur un peu moins de 2 mois. Le régime stationnaire n'avait donc pas encore été atteint au terme du stage. Nous avons pu observer le début de la diminution de la production à partir du 40^{ème} jour. En effet, entre le 20^{ème} et le 40^{ème} jour, la production moyenne était de 400 L/j alors qu'au-delà de cette période, celle-ci n'est plus que de 360 L/j. L'équipe de CEAS Burkina va donc poursuivre l'expérimentation jusqu'à atteindre le régime stationnaire afin de pouvoir réellement évaluer les performances du digesteur.

Pour estimer la production maximale atteignable avec le digesteur modulable en régime stationnaire, nous avons à nouveau procédé à un calcul en nous basant sur le potentiel méthanogène de la bouse de vache (40 litres de gaz par kg de bouse). Pour ce faire, il suffit de multiplier l'alimentation quotidienne en bouse de vache par ce dernier pour obtenir la production journalière de biogaz.

$$\text{Production} = \text{Alimentation} * \text{potentiel méthanogène}$$

$$\text{Production} = 3,6 * 40 = 144 \text{ L/j}$$

À nouveau, nous constatons que la production est relativement faible. Cela s'explique par les faibles quantités de matière mise en jeu. Pour pouvoir réellement juger des performances du digesteur modulable, il faut poursuivre l'expérimentation afin d'atteindre le régime stationnaire et comparer la production obtenue à la production maximale récupérable. À ce stade, la production ne reflète pas réellement les performances du digesteur.

Quand bien même la production atteindrait 144 L/j, celle-ci reste inférieure à celle des biodigesteurs à dôme fixe si elle est rapportée à un volume de digesteur de 1 m³. En effet, un FDBD de 4 m³ produit entre 1 et 1,5 Nm³ de gaz par jour soit entre 250 et 375 L/j pour un digesteur dont le volume total ferait 1 m³. Il faudrait donc au minimum doubler la production pour un même volume de digesteur modulable afin d'atteindre les performances des digesteurs à dôme fixe. Cela peut être réalisé en concevant un digesteur dont le taux de remplissage est plus important. De cette manière, une plus grande quantité de matière sera méthanisée pour un même volume de biodigesteur.

6.4.3.3. Remarques, observations et interprétations

À la suite de l'expérimentation du digesteur modulable, nous pouvons mettre en évidence les points forts et les points faibles de cette nouvelle conception.

Tout d'abord, le digesteur est réellement facile à utiliser. Il suffit d'insérer un seau de substrat chaque jour et de vérifier la pression du digesteur afin qu'elle reste sous la limite (dans le cas présent, 60 mbars). L'évacuation se fait de manière passive. Sur le terrain, des fosses à compost seront aménagées à l'arrière du digesteur pour collecter les digestats.

Le deuxième point fort de ce dispositif est son fonctionnement en continu. Les avantages d'un tel fonctionnement ont été largement exposés au point 3.4. De surcroît, l'expérimentation nous a montré que la composition du gaz est réellement constante. Cette condition est indispensable pour faire du biogaz une source d'énergie fiable.

Par contre, les performances du digesteur en termes de production restent relativement faibles par rapport à celles d'un digesteur à dôme fixe. Avec la production obtenue, il est



possible de préparer à peine un repas tous les 2 jours (ou tous les 4 jours si la préparation est longue).

Ensuite, un autre point fort du digesteur modulable est son accessibilité et sa maintenance aisée. En effet, contrairement au digesteur enterré, ce digesteur de surface est accessible de toutes parts si une intervention est nécessaire.

La capacité de stockage du digesteur ramenée en litres normaux est de 130 litres. Actuellement, vu la production importante, le digesteur n'est pas capable à lui seul de stocker la production. Cependant, une fois que le régime stationnaire sera atteint, la capacité de stockage interne sera de 22h. Cependant, si l'on envisage d'augmenter le taux de remplissage, l'adjonction d'un système de stockage deviendra indispensable. D'ailleurs, elle l'est déjà en phase de démarrage.

En conclusion, le digesteur modulable pallie la plupart des inconvénients des unités existantes (fabrication et utilisation plus simples, meilleure étanchéité, pas de vanne). De plus, la production de biogaz est un peu plus importante mais surtout constante et de très bonne qualité (60% de méthane). L'inconvénient majeur demeure la faible capacité de production. Il reste un dernier critère à évaluer à savoir celui du coût de ce nouveau digesteur.

6.4.4. Estimation du prix

Une estimation du prix du digesteur modulable a été réalisée. Celle-ci est relativement précise étant donné que l'ensemble des matériaux ont dû être achetés pour la réalisation du prototype. Le tableau ci-dessous reprend les éléments nécessaires à la construction du nouveau digesteur ainsi que leur prix.

Description	P.U. [Fr. CFA]	Quantité	Unité	Total [Fr. CFA]
Barrique métallique 200 litres	11000	6	pc.	66000
Tube acier Ø150mm (5,8m)	70000	0.25	m	17500
Tube acier Ø90mm (5,8m)	37500	0.16	m	6000
Système d'alimentation	3000	1	pc.	3000
Tuyaux cuivre 10mm	1000	2	m	2000
Brasage du cuivre sur les bouchons	600	5	pc.	3000
Vanne 3/4"	2500	1	pc.	2500
Réducteur 3/4" - 1/2"	200	2	pc.	400
Mamelon 1/2"	200	2	pc.	400
Brasage du cuivre sur la vanne	1000	2	pc.	2000
Téflon	500	2	pc.	1000
Collier de serrage (20mm)	100	20	pc.	2000
Tuyau gaz (8mm)	1500	3	m	4500
Raccord en T	250	4	pc.	1000
Chambre à air (petit d'occasion)	500	1	pc.	500
Fil de fer	200	1	pc.	200
Baguettes à souder	2000	1	bt.	2000
Disque à couper	1500	1	pc.	1500
Total				115500

Table 6 : Liste du matériel pour la construction du digesteur modulable

Le prix total du digesteur modulable est de 115 500 francs CFA, soit environ 175 €. Ce nouveau prototype est donc près de 30% moins cher que le biodigesteur existant pour une capacité plus importante⁵³.

Le nouveau digesteur possède très peu d'accessoires. L'achat des barriques et du tuyau pour les connecter représente plus de 70% du prix total. Le prix ayant déjà été considérablement réduit, il sera très difficile de concevoir un digesteur constitué de barriques métalliques significativement moins coûteux que celui-ci.

Le prix du digesteur modulable représente un peu plus d'un tiers du prix d'un digesteur enterré de 4 m³. Or, sa production ne vaut qu'un dixième de la production maximale du digesteur à dôme fixe. En termes de coût, le digesteur modulable n'est pas encore suffisamment capable de concurrencer les digesteurs enterrés.

⁵³ Bien que les 2 digesteurs aient un volume total de 1 m³, le premier ne peut contenir que 250 kg de substrat (pour des raisons de fragilité) alors que le nouveau peut en contenir 550.



6.4.5. Pistes d'améliorations

Le digesteur modulable constitue déjà une amélioration conséquente des systèmes précédents. Cependant, un système n'est jamais totalement abouti et des améliorations sont toujours possibles. À notre niveau, nous en avons envisagé quelques-unes afin de pérenniser le système, augmenter sa productivité et élargir le champ de ses possibilités.

6.4.5.1. *Protection contre les dégradations*

Une des grandes interrogations qu'il nous reste à ce stade est la longévité du système. Comme nous l'avons vu, un digesteur à dôme fixe à une durée de vie qui peut atteindre 30 ans. La durée de vie d'un digesteur composé de barriques métalliques sera très certainement inférieure à cela. Néanmoins, il est primordial de tout mettre en œuvre afin d'allonger autant que possible la durée d'utilisation du digesteur modulable.

La première mesure à prendre est de protéger le métal de la corrosion. Le digesteur tout entier est métallique. Une couche de peinture antirouille semble donc être une protection nécessaire. De plus, lors des rares averses, nous avons observé que l'eau stagne sur le dessus de chaque cuve. Ce phénomène risque de fortement accélérer la corrosion. Il faut donc l'éviter en protégeant le digesteur lors des pluies ou en le mettant sous abri.

À côté du métal, le caoutchouc utilisé pour raccorder les cuves est quant à lui sensible au UV. En effet, vu l'ensoleillement des pays africains, le caoutchouc risque de se dégrader rapidement. Il va devenir poreux et finir par s'effriter. Placer du tissu ou toute autre protection opaque sur les raccords en chambre à air est une mesure simple et potentiellement suffisante pour éviter (ou du moins ralentir fortement) la dégradation du caoutchouc.

6.4.5.2. *Amélioration de l'étanchéité*

Lors de l'expérimentation, nous avons constaté qu'il restait de petites fuites de gaz au niveau des bouchons présents sur le dessus des barriques. Le réacteur étant déjà en fonctionnement, nous nous sommes contentés de mastiquer ces bouchons (voir Figure 35).





Figure 35 : Masticage des bouchons des barriques du digesteur modulable

Or, comme déjà discuté précédemment, le mastic ne constitue pas une solution durable. Pour les prochains digesteurs, nous recommandons vivement de souder les bouchons dès la fabrication. De cette manière l'étanchéité sera garantie de manière durable.

6.4.5.3. Amélioration des performances

Dans les sections précédentes, nous avons constaté que la production de biogaz est directement liée à la quantité de substrat méthanisé. Autrement dit, les performances d'un digesteur dépendent de son taux de remplissage. D'autre part, nous avons observé lors de l'expérimentation que du méthane était produit dans la cuve d'évacuation. Celui-ci n'étant pas récupéré, il est perdu dans l'atmosphère.

Fort de ces deux constats, nous avons envisagé une amélioration du prototype. Celle-ci consiste tout simplement à ne plus avoir recours à une cuve d'évacuation afin de limiter le volume de digesteur perdu (improductif). Pour ce faire, la dernière cuve ne sera plus ouverte mais fermée comme toutes les autres. Le digesteur possèdera ainsi 6 cuves utiles à la digestion pour le même prix. Dans cette nouvelle configuration, l'évacuation se fera à l'aide d'un tuyau incliné comme c'est le cas pour l'alimentation (voir Figure 36).

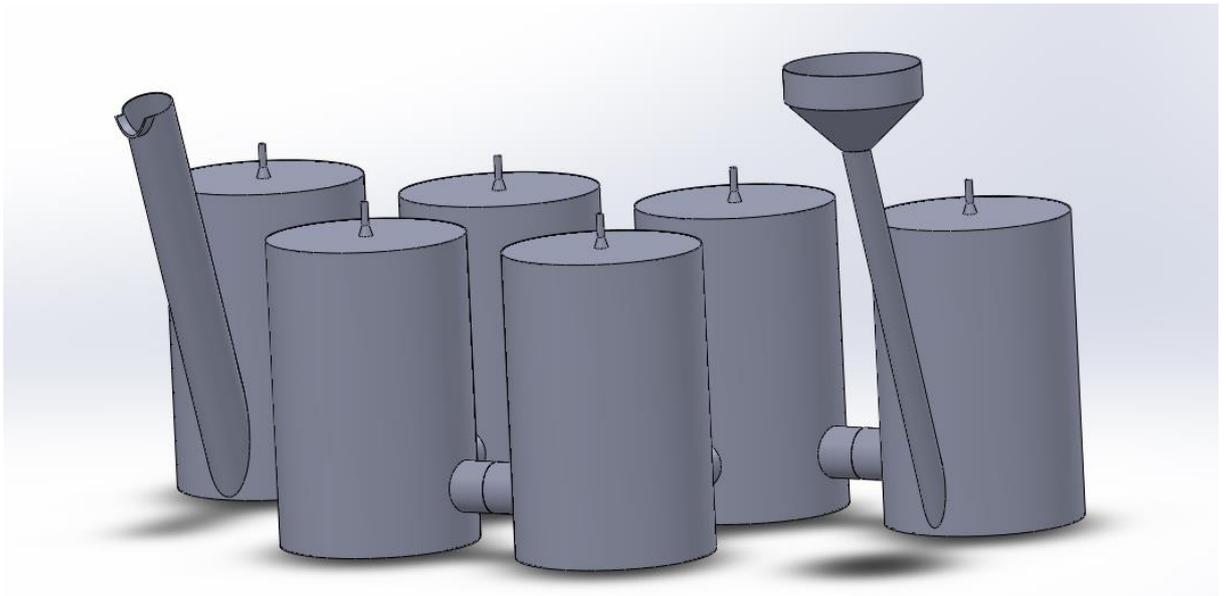


Figure 36 : Digesteur modulable 2.0

Pour aller encore plus loin, nous avons décidé de ne pas limiter la hauteur de ce tuyau à la hauteur des barriques (comme on peut le voir sur la figure ci-dessus). Si les tuyaux d'alimentation et d'évacuation (qui déterminent le niveau supérieur de substrat) sont plus hauts, le niveau de remplissage des barriques peut être plus important tout en conservant une différence de niveau suffisante pour assurer la pression de sortie (voir Figure 37). Il est également à noter que dans cette configuration les variations de niveau à l'intérieur du digesteur sont négligeables étant donné les volumes relativement faibles qui entrent et qui sortent (en bleu sur la figure ci-dessous).

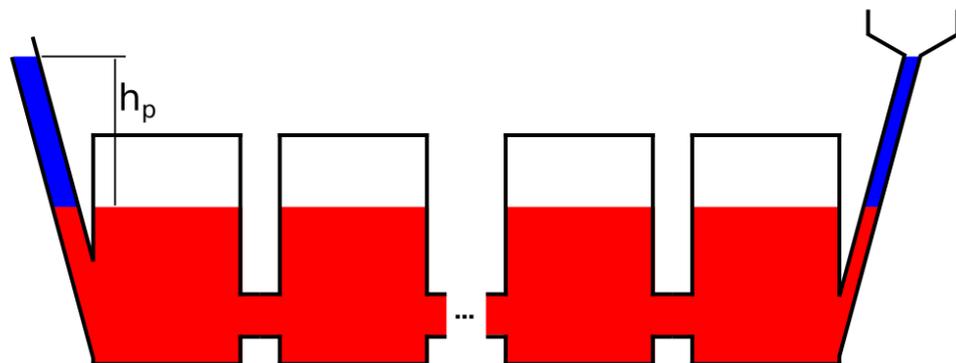


Figure 37 : Schéma du digesteur modulable 2.0

Prenons un exemple, si le tuyau d'évacuation (à gauche sur le schéma) fait 1,2 m de haut, le niveau de remplissage des cuves peut être de 0,6 m tout en conservant une pression de sortie maximale de 60 mbars (dans ce cas h_p sur la figure vaut 0,6 m comme c'était le cas dans la

configuration précédente⁵⁴). L'entonnoir de remplissage se situera alors à 1,45 m du sol. L'alimentation sera donc toujours possible depuis le sol. Le plan de la nouvelle cuve d'évacuation est disponible à l'annexe 12.6. Le plan de la cuve d'alimentation n'a pas été mis à jour étant donné que seule la hauteur de l'entonnoir change.

Cette nouvelle configuration offre donc un système quasi identique au précédent en termes d'utilisation et de matériaux nécessaires à la fabrication. Toutefois, il permet un niveau de remplissage bien plus important. Le volume utile passe donc de 0,40 m³ (voir annexe 12.4) à 0,92 m³, soit plus du double pour le même nombre de cuves.

Nous pouvons dès à présent calculer la production maximale atteignable avec un tel digesteur. Il contient 920 kg de substrat. Si le temps de rétention est de 40 jours, cela signifie que l'alimentation doit être de 23 kg de substrat par jour soit 7,66 kg de bouse (pour un rapport de dilution de 2:1). La production peut donc être calculée comme suit :

$$Production = 7,66 * 40 = 307L/j$$

Une production quotidienne de 300 litres permettrait déjà la préparation d'un repas par jour. La version améliorée du digesteur modulable présente un taux de remplissage identique aux digesteurs à dôme fixe (soit 75%). Il peut donc atteindre les mêmes performances de production. Pour ce faire, il faudrait utiliser un rapport de dilution de 1:1 ce qui permettrait d'augmenter la quantité de bouse traitée et donc la production globale.

Au niveau du prix, il augmenterait d'environ 20 000 francs CFA en raison de l'achat du tuyau d'évacuation et du système de récupération du gaz de la dernière cuve. Soit une augmentation de 15% pour une production qui peut plus que doubler. Le prix s'élèverait donc à 112 000 francs CFA par m³ de digesteur, ce qui reste supérieur au prix des digesteurs enterrés.

En résumé, cette modification du prototype permettrait d'améliorer encore considérablement ses performances sans perdre un seul de ses avantages et pour une augmentation raisonnable du prix. Toutefois, le niveau de remplissage étant supérieur et sans

⁵⁴ Il serait toutefois intéressant d'augmenter la pression interne maximale à 80 mbars afin de permettre l'utilisation d'une lampe. Cela augmenterait la hauteur de l'entonnoir de 20 cm ce qui rendra l'alimentation légèrement moins facile.



le volume de compensation, la capacité de stockage interne va fortement diminuer (voire devenir quasi négligeable) et un système de stockage externe va donc redevenir indispensable.

6.4.5.4. *Étendre le domaine d'utilisation*

Le prototype actuel a le grand avantage d'être compact. Son utilisation pourrait donc être étendue au milieu urbain. Cependant, en milieu urbain le substrat disponible est différent. En effet, une partie moins importante de la population urbaine vit de l'agriculture. La principale source de matière organique serait donc les déchets de cuisine et les déjections humaines.

Pour ce qui est des déchets organiques ménagers, les sections de passage plus importantes permettent leur insertion dans le digesteur. Cependant, pour assurer une bonne méthanisation, il est préférable de les broyer le plus finement possible afin de maximiser la surface de contacts entre les matières et les microorganismes. Cela est également valable pour les déchets verts. Il est à noter que les déchets organiques ont un potentiel méthanogène largement supérieur à celui de la bouse de vache. Avec un digesteur plus petit (moins de fûts) il serait possible de produire bien plus de gaz que ce que nous avons obtenu jusqu'ici de manière à pouvoir couvrir l'ensemble des besoins d'un ménage.

Ensuite, concernant les déjections humaines, il faudrait envisager un raccordement direct des toilettes sur le digesteur⁵⁵. Cela devra faire partie de la suite du développement même pour une utilisation rurale. L'enjeu pour rendre l'utilisation des déjections humaines possible est d'arriver à éviter toute manipulation. Celles-ci sont désagréables et seront rapidement abandonnées par les utilisateurs du digesteur.

Le digesteur modulable de par sa compacité et sa simplicité pourra être intégré dans un grand nombre de contextes. Il faudra cependant veiller à apporter les adaptations nécessaires à chaque cas.

6.5. CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE STOCKAGE

La question du stockage du biogaz est cruciale. Actuellement, il n'existe pas de moyen efficace, sûr et bon marché pour stocker la production d'un digesteur domestique. Contrairement au

⁵⁵ Comme cela est déjà possible avec les digesteurs enterrés à dôme fixe.



butane ou au propane, le biogaz ne peut pas être stocké sous forme liquide dans des bouteilles. Dans les digesteurs domestiques, on distingue 2 manières de stocker (une petite partie) de la production.

Les premiers digesteurs domestiques étaient équipés d'un gazomètre. Un gazomètre est un dispositif constitué de deux cuves qui coulissent l'une dans l'autre. De cette manière, le volume varie ce qui permet de stocker le gaz à pression constante. Bien que ce système soit fonctionnel et bien éprouvé, il s'est avéré mal adapté au contexte rural. En effet, celui-ci étant un mécanisme composé de pièces mobiles, il est sujet à des pannes et des défaillances. De plus, les cuves étant métalliques, elles présentent un risque de corrosion et devront être remplacées alors qu'elles sont onéreuses.

C'est principalement pour répondre à ces inconvénients que les digesteurs à dôme fixe ont été développés. Comme expliqué au point 5.3, dans ce type de digesteur, le gaz est stocké dans le dôme. Ce stockage induit une augmentation de pression qui est limitée (si le niveau descend trop bas le gaz s'échappe du digesteur). De plus, il ne peut jamais être vidé entièrement. Une fois que la pression interne est égale à la pression atmosphérique, il est impossible d'utiliser le gaz restant. L'inconvénient majeur de ce type de stockage est qu'il nécessite d'importants volumes. En général, les digesteurs à dôme fixe sont dimensionnés de manière à présenter une capacité de stockage de 12h. Celle-ci est suffisante pour compenser le décalage entre la production (en continu) et la consommation qui a lieu aux heures des repas. Cependant, une telle capacité de stockage n'est adaptée que si le biogaz est bien utilisé tous les jours et ce, minimum 2 fois par jour.

Notons également que dans la plupart des biodigesteurs à grande échelle le stockage est réalisé à l'aide d'une membrane mobile. Celle-ci adapte le volume du digesteur en fonction de la quantité de gaz produite. Cette technologie fonctionne très bien. Cependant, elle semble difficile à adapter au contexte rural.

Fort de tous ces constats, nous avons tenté de concevoir un système de stockage adapté au contexte rural pour accompagner les digesteurs domestiques du CEAS Burkina mais également d'autres digesteurs si leur stockage interne s'avère insuffisant dans certains cas.



6.5.1. Conception

La conception du système était déjà plus qu'esquissée avant le début de ce travail. Depuis le commencement des essais sur la biométhanisation, le biogaz est stocké dans des chambres à air. Nicolas Zimmermann avait donc proposé l'an passé un système de stockage plus abouti mais toujours basé sur l'utilisation de chambres à air (voir Figure 11, p. 16). Celles-ci ont en effet le grand avantage de constituer un réservoir étanche à volume variable. Reste donc à les intégrer dans un dispositif offrant une certaine sécurité et une facilité d'utilisation.

En septembre 2017, dans le cadre du projet d'énergie durable dispensé aux étudiants du GED à Gramme, un groupe d'étudiants a travaillé sur cette question⁵⁶. Ils sont donc partis de l'idée de Nicolas Zimmermann et ont construit un prototype. Celui-ci est constitué d'une caisse en bois à base carrée de 1 m de côté. Les chambres à air sont placées à l'intérieur de cette caisse et une planche mobile posée sur ces dernières joue le rôle de piston. Il suffit donc de mettre du poids sur cette planche afin que la pression augmente dans les chambres à air et qu'elles se vident jusqu'au bout ou le plus possible.

Le système de stockage qui a été conçu dans le cadre du présent travail est donc simplement une version améliorée de celui développé à Gramme.

Cette fois, le choix a été fait de construire le système de stockage en métal car le CEAS Burkina possède un très bon atelier de ferronnerie. Nous avons donc pu concevoir une cuve ronde (et non carrée) afin que les chambres à air soient mieux contenues et que le dispositif soit moins encombrant.

La principale amélioration est l'ajout de la potence et des poulies afin de rendre les mouvements de la plaque supérieure plus faciles pour l'utilisateur (voir Figure 38).

Le système fonctionne donc comme un ancien puits. Une manivelle placée sur le côté permet de régler la hauteur de la plaque. Lorsque le stockage se remplit, la plaque doit être levée afin que les chambres à

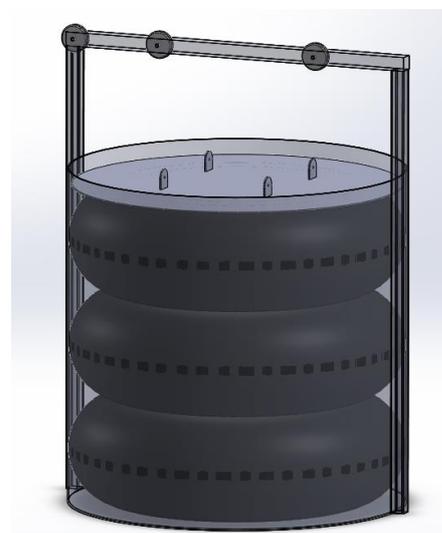


Figure 38 : Système de stockage

⁵⁶ Voir réf. 9.

air soient libres de se gonfler. Ensuite, lorsque l'utilisateur veut consommer le gaz, il est nécessaire de reposer la plaque (éventuellement lestée) sur les chambres à air afin qu'elles se vident.

Ce système est relativement simple. Il permet d'augmenter la pression dans les chambres à air et de les vider entièrement. De plus, la sécurité est légèrement augmentée étant donné que les chambres à air sont protégées des agressions extérieures par la cuve qui les contient. Et cela devrait aussi permettre une extension contenue car si la pression augmente trop dans une chambre à air libre, elle risque d'éclater (revoir l'expérience de l'équipe GED [Réf. 9])

6.5.2. Réalisation

Le dispositif présenté à la section précédente a été réalisé à l'atelier du CEAS Burkina lors du stage (également au cours du mois de mars, directement après la construction du nouveau digesteur). La réalisation s'est également avérée relativement simple et n'a pas posé de problème majeur.

Celle-ci a débuté par la fabrication de la cuve. Pour cela, deux tôles métalliques de 15 dixièmes ont été cintrées (voir Figure 39) puis assemblées de manière à constituer un cylindre.



Figure 39 : Cintrage des tôles métalliques

Ensuite une tôle découpée en forme de disque a été soudée sur ce cylindre afin de le fermer de de servir de fond (Figure 40).



Figure 40 : Construction de la cuve du système de stockage

Une fois la cuve constituée, la potence a pu être assemblée dessus. Les poulies ont tout d'abord été fixées dans un tube métallique carré. Deux autres tubes ont été soudés à la verticale sur la cuve. Ceux-ci servent de support pour le tube contenant les poulies.



Figure 41 : Montage de la potence

Le montage est consolidé par l'ajout d'une barre ronde de 6 mm soudée sur le pourtour supérieur de la cuve ainsi que deux renforts dans les angles des profils constituant la potence. À ce stade, le gros de la construction était terminé. Il restait à construire la plaque qui viendra appuyer sur les chambres à air et la manivelle (Figure 42). Cette dernière a été entièrement fabriquée à l'aide de chutes de l'atelier.



Figure 42 : Plaque et manivelle du système de stockage

Après avoir terminé la construction, une couche de peinture antirouille a été appliquée à l'ensemble afin d'assurer la longévité du système. Ensuite les chambres à air ont pu être placées à l'intérieur de la cuve et raccordées entre elles à l'aide de tuyaux souples et de colliers de serrage. Le circuit gaz a également été réalisé à ce moment-là (Figure 43). Celui-ci se compose de 2 vannes et d'un manomètre. De cette manière, il est possible de connecter d'un côté (à l'entrée) le biodigesteur et de l'autre (à la sortie) les postes d'utilisations (foyer et lampe à gaz).

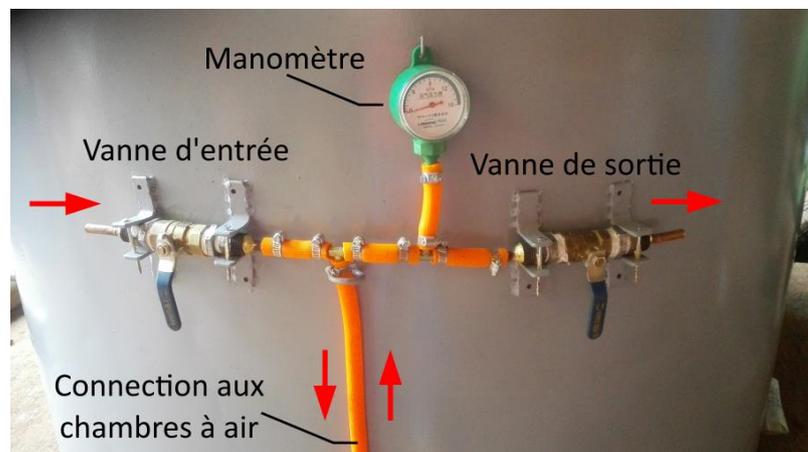


Figure 43 : Circuit gaz du système de stockage

La dernière étape pour la finalisation du système était la mise en place de la plaque et le montage du système de levage. Pour cela, de simples cordes en nylon ont été utilisées pour attacher la plaque métallique à la manivelle et ce en passant par les poulies. La figure suivante représente une vue d'ensemble du système de stockage terminé.



Figure 44 : Prototype du système de stockage terminé

Finalement, Il aura fallu environ 5 jours pour clôturer la fabrication du système de stockage. Celui-ci fut donc achevé le 30 mars 2018, ce qui a permis de disposer de 2 mois pour l'expérimenter. Le système est composé de 3 chambres à air 1200x35 (c'est-à-dire de 1,2 m de diamètre extérieur et de 35 cm pour le petit diamètre). Sa capacité de stockage est donc d'environ 770 litres.

6.5.3. Expérimentation

Dans ce cas, l'expérimentation consistait essentiellement à déterminer l'efficacité du système et la facilité d'utilisation. Cela a été réalisé simultanément aux autres expérimentations. Nous nous sommes donc réellement servis du système de stockage pour conserver la production de gaz et pour réaliser les essais de cuisson. C'est au travers des différentes manipulations que nous avons pu mettre en évidence les points forts et les points faibles du système.

Tout d'abord, nous avons constaté que la capacité de stockage était bien adaptée. Celle-ci permet largement le stockage de toute une journée (voire une journée et demie) de production du digesteur modulable. Elle est également suffisante pour la préparation d'un repas complet (jusqu'à 3h de cuisson).

Ensuite, nous n'avons pas constaté de pertes significatives du système. Après 24 heures la pression interne des chambres à air ne change pas. Cela nous assure la bonne étanchéité du dispositif.

Le remplissage du système se fait sans encombre. Nous avons cependant remarqué que toutes les chambres à air ne se remplissent pas à la même vitesse. Il faut donc un certain temps après le remplissage pour que les pressions se rééquilibrent entre les différentes chambres à air. Ce phénomène ne se produit pas lorsque le système de stockage est connecté en permanence au digesteur modulable car dans ce cas de figure le remplissage se fait très progressivement.

Pour ce qui est de l'utilisation du gaz, celle-ci se passe bien tant qu'il y a de la pression dans les chambres à air. Une fois que la pression au sein du système de stockage est égale à la pression atmosphérique (à ce moment le stock est loin d'être vide), la vitesse de sortie du gaz n'est pas suffisante pour avoir une bonne flamme car la plaque n'est pas assez lourde. Nous avons donc ajouté du poids sur cette plaque. Cependant, nous nous sommes rendus compte qu'une masse importante (aux alentours de 100 kg) est nécessaire pour maintenir une bonne flamme⁵⁷. Ce lestage de la plaque rend l'utilisation beaucoup moins simple car une fois lestée, la plaque ne peut plus être manipulée grâce à la manivelle. Il faut au préalable retirer tout le poids.

Pour finir, nous avons constaté que les chambres à air s'usent et se déforment moins vite lorsqu'elles sont contenues et que leur dilatation est limitée. Cette conclusion a pu être tirée en comparant l'état des chambres à air du système de stockage à l'état de deux autres qui sont libres et dont nous nous servons pour prendre les mesures. La durée de vie des chambres à air est donc plus importante lorsqu'elles sont placées dans un contenant.

En conclusion, nous pouvons dire que le système de stockage fonctionne comme prévu. Il répond aux besoins pour lesquels il a été conçu : servir de tampon entre la production et l'utilisation et protéger et contenir les chambres à air. Son principal point faible est au niveau du maintien d'une pression de sortie suffisante. Cela est possible avec l'ajout d'un poids

⁵⁷ Un lestage de 100 kg permet d'augmenter la pression interne du système de stockage d'environ 10 mbars.



suffisamment important. Par contre, ces manipulations rendent son utilisation plus compliquée.

6.5.4. Estimation du prix

Une estimation du prix du système de stockage a été réalisée. Celle-ci est relativement précise étant donné que l'ensemble des matériaux a dû être acheté pour la réalisation du prototype. Le tableau ci-dessous reprend les éléments nécessaires à la construction du système de stockage ainsi que leur prix.

Description	P.U. [Fr. CFA]	Quantité	Unité	Total [Fr. CFA]
Chambre à air 1200x24	22000	3	pc.	66000
Tôle 15/° grand format	20000	3	pc.	60000
Tôle 2,5mm grand format	40000	1	pc.	40000
Cornière en T 30x40	1350	2.5	m	3375
Tube carré 50x50	3700	1.5	m	5550
Tube rectang. 30x50	2000	3.4	m	6800
Poulie	5000	3	pc.	15000
Corde	125	10	m	1250
Construction manivelle	3500	1	pc.	3500
Peinture antirouille	1500	2	kg	3000
Vanne 3/4"	1000	2	pc.	2000
Réducteurs 3/4" - 1/2"	200	4	pc.	800
Mamalon 1/2"	200	4	pc.	800
Brasage du cuivre sur la vanne	1000	4	pc.	4000
Téflon	500	1	pc.	500
Collier de serrage (20mm)	100	18	pc.	1800
Tuyau gaz (16-10mm)	1500	3	m	4500
Raccord en T	250	4	pc.	1000
Manomètre	5000	1	pc.	5000
Baguettes à souder	2000	1	bt.	2000
Disque à couper	1500	1	pc.	1500
Total				228375

Table 7 : Liste du matériel pour la construction du système de stockage

Le prix total de la construction du système de stockage est de 228 375 francs CFA, soit environ 350 €. Ce prix est le double du prix de la construction du digesteur modulable. Il est clair qu'un tel système de stockage ne sera jamais adjoint aux digesteurs *low cost* développés par le CEAS Burkina en raison du coût.

Le but ici était de concevoir un prototype performant et d'une certaine dimension afin de déterminer dans quelle mesure ce système pourrait être adjoint à des installations plus importantes, comme les digesteurs à dôme fixe du PNB-Bf dont le stockage interne ne dépasse pas 12 heures. Dans la suite du développement, il serait intéressant d'envisager une version plus petite et *low cost* de ce système afin d'accompagner un digesteur modulable par exemple.

6.5.5. Pistes d'améliorations

Contrairement au biodigesteur qui a atteint une configuration relativement aboutie, le système de stockage n'est encore qu'au début de son développement. Nous envisageons donc ici des pistes d'améliorations pour les deux principaux points faibles du dispositif réalisé à savoir son prix et la difficulté d'utilisation.

Le premier inconvénient majeur du prototype développé est son coût. Comme nous l'avons vu, celui-ci dépasse le double du prix d'un biodigesteur modulable. Il sera donc très difficile (voire impossible) pour les populations rurales de se le procurer. Or, le digesteur modulable nécessite obligatoirement un système de stockage interne d'où l'importance de diminuer drastiquement le prix de celui-ci.

Pour ce faire, nous avons imaginé de réaliser un système similaire mais en bois. Le CEAS Burkina possède l'outillage nécessaire pour cintrer des panneaux de bois afin de réaliser une cuve ronde et non carrée ce qui nous semble indispensable pour que les chambre à air soient bien contenues. De plus, il serait intéressant de réduire la dimension de la cuve. Nous avons effectivement rencontré des difficultés à trouver des chambres à air de plus d'un mètre de diamètre et celles-ci sont chères. Il serait donc judicieux d'employer des chambres à air dont le diamètre est de un mètre. Une estimation du prix d'un tel système a été réalisée (voir Table 8).



Système de stockage en bois				
Description	P.U.	Quantité	Unité	Total
Chambre à air 1000x40cm	15000	3	pc.	45000
Panneaux de bois 10mm - 1,2x2,4m	8000	2	pc.	16000
Chevrons 60x80	1000	4.5	m	4500
Poulie	5000	3	pc.	15000
Corde	125	10	m	1250
Construction manivelle	3500	1	pc.	3500
Peinture de protection	1500	2	kg	3000
Vanne 3/4"	1000	2	pc.	2000
Réducteurs 3/4" - 1/2"	200	4	pc.	800
Mamalon 1/2"	200	4	pc.	800
Soudure du cuivre sur la vanne	1000	4	pc.	4000
Teflon	500	1	pc.	500
Colier de serrage (20mm)	100	18	pc.	1800
Tuyau gaz (16-10mm)	1500	3	m	4500
Raccord en T	250	4	pc.	1000
Manomètre	5000	1	pc.	5000
Total				108650

Table 8 : Liste du matériel pour la construction du système de stockage en bois

Nous constatons que la construction d'un tel système de stockage serait de 108 650 francs CFA (soit 165 €). Le prix est donc diminué de moitié par rapport au premier prototype pour une capacité de 710 litres (à peine 10% de moins). Il reste cependant trop élevé au regard du prix du biodigester. D'autres améliorations seront donc à envisager afin de réduire davantage les coûts de construction.

Le deuxième point à améliorer est l'utilisation du système rendue compliquée à cause du lestage important nécessaire. Un système de démultiplication permettrait de manipuler cette grosse charge à l'aide de la manivelle. Il faut toutefois veiller à utiliser des cordes suffisamment résistantes. Tout cela, risque encore une fois de faire augmenter le prix alors qu'il est indispensable de le réduire.

Le prototype réalisé lors du stage était le tout premier du CEAS Burkina. Des améliorations devront être apportées afin que le système de stockage soit efficace, simple à utiliser et bon marché à l'image du biodigester modulable.

7. COMPARAISON DES TECHNOLOGIES BIODIGESTIVES

Au terme de ce travail, le développement du biodigesteur du CEAS Burkina semble bien abouti. Les améliorations restantes concernent principalement la capacité de production (en grande partie résolu dans la version 2.0). Mis à part cela, le concept est éprouvé et relativement optimisé même s'il reste toujours à faire. Il est donc maintenant temps d'élargir notre point de vue afin de juger de la pertinence et de l'avenir de ce biodigesteur modulable pour une implémentation sur le terrain dans les PVD.

Ce chapitre propose donc une modeste comparaison de la technologie développée à celle des digesteurs enterrés à dôme fixe. Comme nous l'avons vu, ce dernier a été développé il y a bien longtemps et a connu de nombreuses améliorations au fil du temps. De plus, il a servi de technologie de base pour un grand nombre de vastes plans nationaux.

Pour commencer, nous allons tenter de comprendre pourquoi le digesteur à dôme fixe est la technologie élue pour les plans nationaux et la mise en place à grande échelle du biogaz domestique dans les zones rurales. Cette partie débutera donc par un bref résumé d'une étude comparative de ce type de digesteur avec les autres technologies de digesteurs domestiques. Cette étude a été réalisée en 2015 par l'Université du Rwanda en collaboration avec la SNV⁵⁸. Celle-ci sera suivie d'une comparaison entre le digesteur de surface modulable développé au CEAS Burkina et ces mêmes digesteurs à dôme fixe.

7.1. RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTS DIGESTEURS DOMESTIQUES EXISTANTS

Tout comme le Burkina Faso, le Rwanda possède un programme national des biodigesteurs instigué par la SNV. La création de celui-ci est antérieure à celle du PNB-Bf. Bien que similaire, les digesteurs à dôme fixe du Burkina Faso sont une amélioration de ceux du Rwanda. Parallèlement au développement des digesteurs en maçonnerie (promus par la SNV et les programmes nationaux), d'autres technologies de biodigesteur ont fait leur entrée sur le

⁵⁸ Voir réf. 20.



marché du biogaz Rwandais. Les deux principales sont les digesteurs à dôme fixe en fibre de verre (préfabriqués en Chine) et les digesteurs en bâches plastiques.

Avec l'avènement de ces autres technologies, la SNV et l'Université de Kigali ont mené, en 2015, une étude comparative afin d'évaluer les performances techniques, financières et socioéconomiques des 3 types de biodigesteurs. L'étude a été réalisée sur 19 digesteurs en fonctionnement dans des fermes. Ceux-ci étaient tous de taille identique soit 6 m³.

D'après les statistiques 78,3% des digesteurs à dôme fixe installés dans le pays sont en fonctionnement contre seulement 47% pour les digesteurs en fibre de verre. Les digesteurs en bâches plastiques n'ont été introduits dans le pays qu'en 2014, une telle statistique n'était donc pas disponible au moment de l'étude.

L'étude a révélé que les digesteurs à dôme fixe présentent la production de gaz la plus importante pour une quantité donnée d'un même substrat. Ainsi, ce sont eux qui offrent le plus d'heures de cuisson et la plus grande économie de bois de chauffe. L'autre principal point fort de cette technologie est sa robustesse qui ne nécessite quasiment aucune maintenance et réparation. Les digesteurs en fibres de verre sont quant à eux les moins sensibles aux variations de température. Par contre, ils présentent les frais de réparation les plus élevés et de loin. Pour terminer, les digesteurs en bâches sont les plus intéressants sur le plan économique. En effet, leur très faible prix et les réparations bon marché en font la technologie la plus rentable. Cependant, les performances de ces digesteurs sont les moins bonnes. De plus, leur utilisation semble beaucoup moins simple que pour les deux autres technologies et ils nécessitent de très nombreuses réparations.

Les principaux inconvénients du digesteur à dôme fixe sont l'investissement de départ élevé et le temps de construction. Mis à part cela, il reste, jusqu'à présent, la technologie la plus performante et la plus fiable du marché en terme de biogaz domestique. C'est pour cette raison que l'ensemble des plans nationaux se basent sur cette technologie lorsqu'il s'agit de développer le secteur du biogaz dans un pays du sud.



7.2. COMPARAISON DE LA TECHNOLOGIE DÉVELOPPÉE ET DU DIGESTEUR À DÔME FIXE⁵⁹

L'objectif poursuivi lors de la conception d'un nouveau biodigesteur domestique était justement de pallier les inconvénients des digesteurs à dôme fixe qui restent chers et dont la construction nécessite un chantier conséquent. Arrivé au terme du développement et grâce aux expérimentations menées lors du stage, nous sommes en mesure de comparer le digesteur modulable au digesteur à dôme fixe sur un certain nombre de paramètres afin d'évaluer si les objectifs initiaux sont atteints.

Pour commencer, nous allons comparer les performances et la capacité de production. Comme nous l'avons vu, la capacité de production du digesteur modulable reste limitée. Cependant, celle-ci est supérieure dans la version 2.0 (voir l'amélioration présentée au point 6.4.5.3). En ce qui concerne la performance d'un digesteur, celle-ci peut être représentée par la quantité de méthane réellement récupérable par kg de bouse grâce au digesteur. Pour le digesteur à dôme fixe cette valeur est connue et est d'environ 35 litres de biogaz par kg de bouse (maximum 36,47 L/kg). Par contre, n'ayant pas encore atteint le régime stationnaire, ce paramètre n'a pas encore pu être calculé pour le digesteur modulable. Néanmoins, dans le stade transitoire actuelle et aux dernières mesures, la production était au stade de 80 L/kg, cette valeur illustre bien que le régime stationnaire n'est pas encore atteint car elle est trop élevée (le maximum étant 40 L/kg).

Le deuxième critère de comparaison est la pression interne des digesteurs. En effet, comme nous l'avons vu dans le cas de l'utilisation d'une lampe, la pression de sortie est la facteur clé pour un bon fonctionnement. Dans un digesteur à dôme fixe, la pression de sortie varie entre 2 et 80 mbars en conditions réelles d'utilisation. L'étude comparative a démontré que la pression moyenne de sortie était de 44 mbars. Le digesteur modulable quant à lui à une pression de sortie maximale de 60 mbars. La pression moyenne d'utilisation se situe entre 20 et 30 mbars. Sur ce point les digesteurs à dôme fixe restent donc meilleurs. Cependant, la pression maximale de fonctionnement du digesteur modulable peut être augmentée en modifiant légèrement la configuration comme dans la version 2.0 par exemple (voir 6.4.5.3).

⁵⁹ Les données chiffrées concernant les digesteurs à dôme fixe proviennent de l'étude comparative [Réf. 20]



Pour poursuivre, nous allons nous attarder sur la facilité d'utilisation des deux systèmes. Le fonctionnement étant relativement similaire, nous pouvons considérer que l'utilisation est semblable. Dans les deux cas, l'alimentation se fait en déversant le substrat dans le digesteur et l'évacuation se fait de manière passive. Aucune distinction notable n'est faite sur ce critère.

Par contre, la facilité de montage n'est pas du tout la même. Un digesteur à dôme fixe nécessite un chantier important d'une durée d'environ 2 semaines. De son côté, le digesteur modulable est préfabriqué en atelier en à peine 3 jours et peut être installé en une demi-journée de travail. La fabrication et la mise en place aisées sont clairement des points forts du digesteur modulable.

De plus, de par sa compacité et sa modularité, le digesteur modulable est capable de s'adapter à un grand nombre de contextes. Le digesteur à dôme fixe quant à lui nécessite de grands espaces et est plutôt réservé au contexte rural. Du moins, son installation est difficilement envisageable pour un ménage urbain ne disposant que de très peu de place.

En ce qui concerne la robustesse, le digesteur à dôme fixe reste indétrônable. Avec sa très longue durée de vie et ses besoins en maintenance réduits, il reste la technologie la plus durable. Par contre, le digesteur modulable étant en surface, son accès est très simple et la maintenance peut s'opérer sans difficulté. Si une cuve ou un raccord fait défaut, il peut être remplacé rapidement par le propriétaire lui-même.

La capacité de stockage interne est directement liée au taux de remplissage. Dans le cas d'un digesteur à dôme fixe, celui-ci atteint 75%. Grâce au bassin de compensation, la capacité de stockage s'élève à 12 heures. Dans le cas du digesteur modulable, le taux de remplissage est bien inférieur et la capacité de stockage interne atteint 22 heures (une fois le régime stationnaire atteint). Cette capacité importante est due principalement à la faible production. Dans la version améliorée du digesteur modulable, le taux de remplissage est semblable à celui du digesteur à dôme fixe mais le volume de déversement est négligeable. Cela entraîne une capacité de stockage quasiment nulle.

Pour terminer, en termes de coût, les digesteurs à dôme fixe représentent un investissement important. Cependant, il faut mettre le prix en rapport avec la capacité de production (ou en rapport au volume du digesteur si les productions sont semblables). Le prix d'achat d'un digesteur enterré revient environ à 75 000 francs CFA par m³ (hors subside) contre 115 000



francs CFA pour le digesteur modulable de 1 m³. Le digesteur à dôme fixe reste donc moins cher.

Ci-dessous, un tableau récapitulatif reprendre les différents paramètres de comparaison pour les deux versions du digesteur modulable ainsi que pour le digesteur à dôme fixe.

Paramètres de comparaison	Unité	Digesteur modulable	Digesteur modulable 2.0	Digesteur à dôme fixe
Capacité de production max*	Nm ³ /j	0,144	0,307	0,250 – 0,375
Performance	L/kg	?	?	36,47
Pression de sortie moyenne	mbars	20 – 30	>	45
Facilité d'utilisation	/	=	=	=
Facilité de montage	/	++	++	-
Robustesse	/	-	-	++
Facilité de maintenance	/	+	+	-
Flexibilité	/	+	+	-
Adaptabilité	/	+	+	-
Taux de remplissage	/	40%	75%	75%
Capacité de stockage interne	h	22	~0	12
Coût*	francs CFA	115 000	112 000	75 000

*Calculé pour 1 m³ de digesteur

Table 9 : Synthèse de la comparaison des digesteurs

En conclusion nous pouvons dire que les principaux avantages du digesteur à dôme fixe sont sa grande capacité de production, sa robustesse et son coût relativement faible. Du côté du digesteur modulable, les principaux points forts sont sa facilité de montage, sa flexibilité et son adaptabilité à une diversité de contextes. Il reste cependant des améliorations à apporter (même au-delà de la version 2.0) afin d'atteindre les performances des digesteurs enterrés. Une fois cet objectif réalisé, le digesteur modulable aura sa place sur le marché car il offre une alternative pertinente et une complémentarité aux digesteurs à dôme fixe.

8. POUR ALLER PLUS LOIN : EXPÉRIENCE AU BÉNIN

Par l'intermédiaire de Mme Anne-Michèle Janssen, nous avons été mis en contact avec l'université d'Abomey-Calavi au Bénin et en particulier avec les responsables de la nouvelle formation en énergies renouvelables. Nous avons appris que ceux-ci s'affairent également sur la construction d'un nouveau type de biodigester mais qu'ils rencontraient certaines difficultés.

Dans le courant du mois d'avril, des membres du CEAS Burkina devaient participer à une mission au Bénin. Il s'agissait d'une rencontre avec les acteurs publics et privés du secteur des énergies renouvelables du Bénin. Par chance, il a été possible d'intégrer cette mission afin de rencontrer nos correspondants de l'université. De cette manière nous avons pu partager nos expériences respectives.

Ce chapitre reprend les principales visites effectuées en lien avec le biogaz lors de ce voyage au Bénin. Il débute par la découverte des cités lacustres afin de décrire le contexte dans lequel les recherches de l'université sont menées. Ensuite, un compte rendu de notre échange avec l'université d'Abomey Calavi sera exposé. Et finalement, une brève présentation du centre Songhaï et de ses biodigesteurs sera faite.

8.1. VISITE DES CITÉS LACUSTRES

Non loin de Calavi, sur le lac Nokoué, se situe le petit village de Ganvié (voir Figure 45). Perché sur des pilotis, ce village est l'un des plus importants des cités lacustres du Bénin. Au total, ce sont près de 35 000 habitants qui vivent sur le lac. Lors de notre mission, nous avons eu l'opportunité de visiter le village de Ganvié et de voir comment y vivent les gens.





Figure 45 : Village de Ganvié, le 29 avril 2018

Ces populations font partie des plus pauvres du Bénin. Leur activité principale est la pisciculture. Les hommes pêchent les poissons d'élevage et les femmes les vendent sur le continent. Ils pratiquent également un peu l'élevage de volailles (notamment) sur de petites îles artificielles qui ont été aménagées à cet effet.

Le lac communique avec l'océan. Son eau est donc salée et non potable. L'approvisionnement en eau potable du village est assuré par 2 forages où les habitants se rendent en pirogue pour remplir leur bidon (voir Figure 46).



Figure 46 : Distribution d'eau potable depuis le forage (Ganvié)

Les eaux usées de la population ainsi que les excréments des animaux sont déversés dans le lac. Heureusement le lac est peu profond (environ 2 mètres) et le fort ensoleillement assure une certaine désinfection grâce aux UV. Cependant, ces pratiques peuvent engendrer des risques sanitaires importants.

L'autre problématique importante est l'approvisionnement énergétique du village. Pour l'électricité, les gens qui ont les moyens possèdent un groupe électrogène. Celui-ci est utilisé à l'intérieur même des habitations. En plus de la pollution, cela engendre des problèmes de santé pour la population. Actuellement, les premières installations PV ont vu le jour dans le village mais le coût d'accès à cette technologie reste un obstacle majeur. Pour la chaleur, les gens emploient principalement du bois et du charbon de bois. Comme nous l'avons vu, dans le contexte de l'Afrique ces sources d'énergie ne sont pas durables.

Ces populations marginales sont totalement délaissées par le développement. Aucune technologie adaptée à leur mode de vie n'a été développée que ce soit pour l'accès à l'énergie, pour les toilettes ou tout simplement pour améliorer leurs conditions de vie.

8.2. LE PROJET DE L'UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI

Contrairement au Burkina Faso, le Bénin ne possède pas encore de programme national des biodigesteurs⁶⁰. Actuellement, seuls 153 biodigesteurs à dôme fixe ont été construits sur le territoire béninois⁶¹. Cependant, même si un programme national voit le jour, la technologie des digesteurs enterrés sera très difficile, voire impossible à mettre en place dans les cités lacustres. Pourtant, la biométhanisation serait la bienvenue dans ce contexte étant donné qu'elle offre un accès à l'énergie, une voie de traitement des déjections animales et la possibilité d'installer des toilettes dans le village tout en préservant l'environnement (éviter la déforestation).

C'est pour toutes ces raisons que l'université d'Abomey-Calavi (UAC) travaille actuellement sur le développement d'un nouveau biodigesteur. L'idée de départ est de se servir de polytanks en plastique (utilisés pour les châteaux d'eau des particuliers). Ce nouveau type de

⁶⁰ Le projet est cependant sur la table. Celui-ci devrait avoir le jour dans les mois ou les années à venir grâce au soutien de la SNV encore une fois.

⁶¹ Source : Réf. 18.



digesteur serait donc un digesteur de surface (tout comme le prototype développé par le CEAS Burkina) et pourrait être installé à Ganvié ainsi que dans les autres villages lacustres.

Lors de notre visite à l'université, nous avons pu voir les prototypes qui avaient été construits (voir Figure 47). Ceux-ci n'avaient encore jamais été expérimentés à cause de leur manque d'étanchéité. C'est principalement le couvercle supérieur qui pose problème. Malgré ses efforts, l'équipe de l'université ne parvient pas à atteindre un niveau d'étanchéité correcte.



Figure 47 : Premiers prototypes réalisés par l'UAC

L'avantage du plastique est qu'il est plus durable dans le temps. Il n'est pas sujet à la corrosion comme le métal. Cependant, la réalisation de l'étanchéité s'avère bien plus complexe (nous en avons fait l'expérience à HELMo-Gramme). De plus, partir d'un polytank permet de se rapprocher davantage d'un réacteur cuve avec un seul volume, ce qui n'est pas le cas du digesteur développé au CEAS Burkina. Partir d'un polytank semble donc être pertinent et adapté au contexte de Ganvié⁶².

Lors de notre séjour au Bénin, un échange plus approfondi a pu être organisé avec des élèves et les responsables du projet (Clément Kouhadé et Gabin Koto N'Gobi, Basile Kounouhewa étant en voyage n'était pas présent). Ensemble nous avons revu la conception de leur biodigesteur afin de pallier le problème d'étanchéité et d'améliorer son fonctionnement (comme cela avait été fait au CEAS Burkina lors de ce travail).

⁶² L'idée de partir d'un polytank a très vite été abandonnée par le CEAS Burkina en raison du prix exorbitant des polytanks au Burkina Faso. Au Bénin le prix est quasi divisé par 2 soit un peu plus de 100 000 francs CFA (150 €) pour un tank de 2000 litres ce qui rend la solution potentiellement abordable.

En ce qui concerne l'étanchéité, nous avons décidé de retourner le polytank afin que les points sensibles (le couvercle principalement) soit immergés⁶³. De cette manière, il ne faut plus réaliser une étanchéité au gaz mais une étanchéité au substrat, ce qui s'avère plus simple. La seule ouverture qui ne sera pas immergée est la sortie de gaz (comme c'est le cas sur le digesteur modulable).

Ensuite une réflexion semblable à celle menée lors de la conception du digesteur modulable nous a poussé encore une fois à tenter de reproduire le principe de fonctionnement des digesteurs à dôme fixe. Celui-ci permet d'éviter le recours à des vannes et simplifie fortement l'utilisation du digesteur. Ainsi, le digesteur que nous avons conçu possède un tuyau d'admission, un tuyau d'évacuation et une sortie gaz. Il se veut extrêmement simple à l'image du digesteur modulable (voir Figure 48).

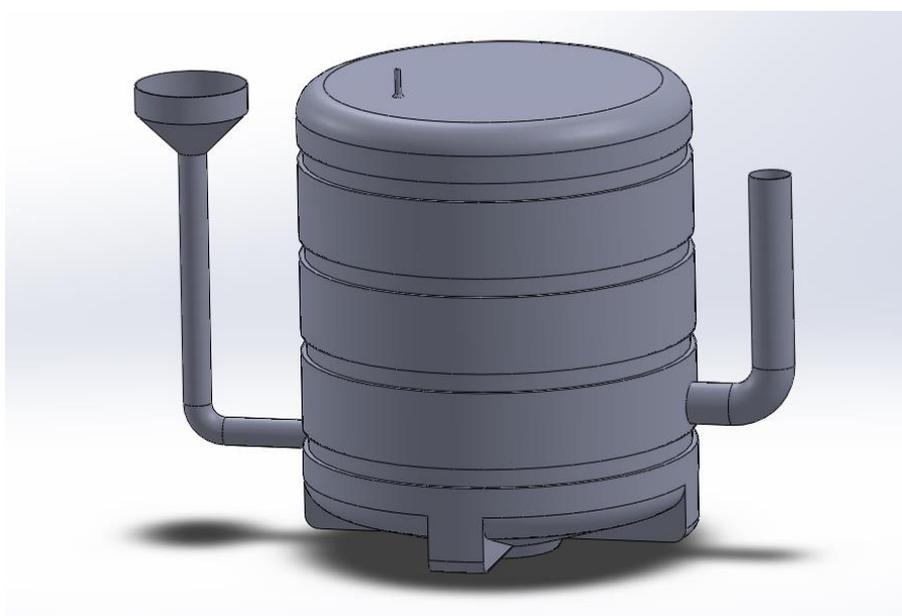


Figure 48 : Modélisation 3D du concept de biodigérateur en polytank élaboré avec l'équipe de l'université lors de notre voyage au Bénin

L'équipe de l'université va donc tenter de modifier ses prototypes afin de les mettre dans la configuration présentée ci-dessus. Un tel digesteur peut être rempli à moitié tout en présentant une pression de sortie suffisante. Dans ce cas, la quantité de substrat serait donc deux fois plus importante que dans le digesteur modulable. En première prévision, on peut

⁶³ Cette astuce avait été mise en place lors du développement que nous avons fait à HELMo-Gramme (voir réf. 10).

s'attendre à une production de 500 litres de biogaz par jour en régime stationnaire pour un polytank de 2 m³. Vu l'absence de bassin de déversement, la capacité de stockage interne de ce digesteur sera quasiment nulle.

Une étude approfondie de cette nouvelle conception ainsi qu'une expérimentation et une poursuite du développement pourraient faire l'objet d'un travail de fin d'études. Nous n'entrerons donc pas plus en détails dans cette étude à notre niveau. Toutefois, un plan ainsi qu'un premier dimensionnement très succinct sont disponibles en annexe 12.8 et 12.9.

8.3. VISITE DU CENTRE SONGHAÏ DE PORTO-NOVO

Lors de notre séjour, nous avons également eu l'occasion de découvrir le centre Songhaï de Porto-Novo. Songhaï est un centre de production en système intégré dont l'objectif est d'être autonome à tous les points de vue et de limiter au maximum sa production de déchets. Les nombreuses activités du site couvrent le secteur primaire (agriculture, élevage, pisciculture, apiculture, etc.), le secteur secondaire (agro-transformation, production d'énergie, recyclage des déchets, etc.) ainsi que le secteur tertiaire (vente, visites, formations, restauration, services, diffusion, etc.).

Le centre de Porto-Novo est le tout premier centre Songhaï. Il a été créé en 1985 par un frère dominicain d'origine nigériane. Depuis lors, de nombreux autres centres ont été créés au Bénin, au Nigeria et dans bon nombre de pays d'Afrique de l'ouest. La philosophie Songhaï a insufflé un nouveau modèle indépendant qui permet une production respectueuse de l'Homme, de l'environnement et économiquement viable.

Comme mentionné, le centre est quasi autonome. Pour cela, il doit produire lui-même l'énergie dont il a besoin pour ses différentes activités. Le principal moyen de production d'énergie du site est la biométhanisation⁶⁴. Lors de notre visite, nous avons pu apercevoir au moins 6 biodigesteurs à dôme fixe dont la capacité varie de 6 à 20 m³ (voir Figure 49). D'après l'information que nous avons reçue, le site (de 22 ha) totaliserait 750 m³ de biodigesteurs. Encore une fois, la SNV a été un partenaire clé dans la mise en place du biogaz au centre.

⁶⁴ À côté de la biométhanisation, des installations PV et des unités de pyrolyse de la biomasse (production de gaz et de biochar) sont également présents sur le site.





Figure 49 : Biodigesteur à dôme fixe du centre Songhaï

Contrairement au contexte rural, au centre Songhaï le biogaz est principalement utilisé pour produire de l'électricité. Cette utilisation plus complexe du gaz nécessite un traitement et un stockage adapté.

Tout d'abord, le biogaz produit passe dans un ensemble de filtres afin d'être purifié. La première étape est d'évacuer les vapeurs d'eau contenues dans le biogaz. Pour cela, on utilise de simples pièges à eau (récipient de collecte des condensats placé au point bas du circuit). Ensuite, il faut extraire le CO_2 , le H_2S et le NH_3 afin d'obtenir du méthane le plus pur possible. Il est surtout indispensable d'extraire le H_2S et le NH_3 car ceux-ci sont corrosifs et risquent de dégrader rapidement le moteur. Pour ce faire, un filtre contenant différentes substances est utilisé (voir Figure 50). La chaux permet de capturer le gaz carbonique, le charbon permet la rétention des gaz azotés et pour finir, la limaille de fer neutralise les gaz soufrés corrosifs.

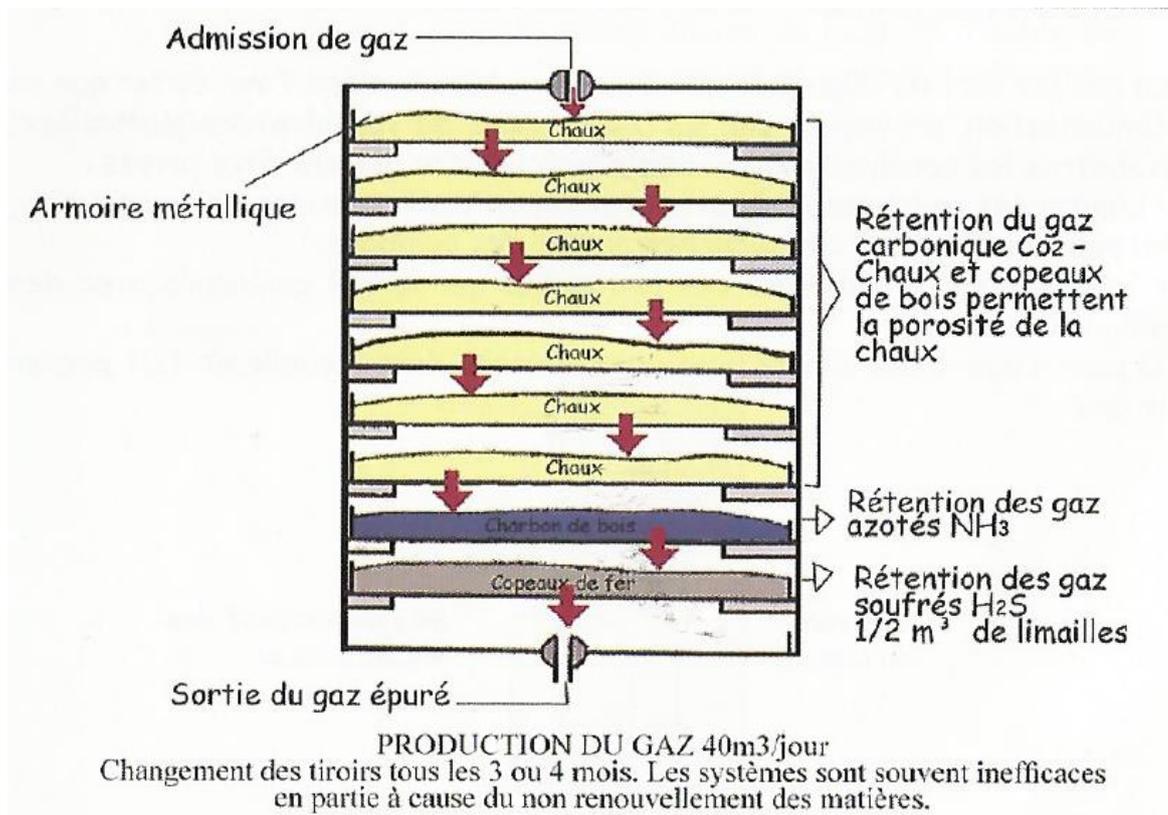


Figure 50 : Système de purification du biogaz [Réf. 7]

Pour assurer une bonne purification, 3 filtres identiques contenant l'ensemble des substances sont placés l'un à la suite de l'autre. Ces filtres de constitution assez simple permettent d'obtenir du méthane suffisamment pur que pour être utilisé dans les générateurs.

Après purification, le gaz est stocké dans des cuves à une pression maximale de 10 bars à l'aide d'un compresseur (voir Figure 51). Pour pouvoir alimenter un moteur, la pression de sortie du biogaz doit être constante et bien régulée. Avec un stockage à haute pression, cela peut être réalisé facilement à l'aide d'un détendeur.

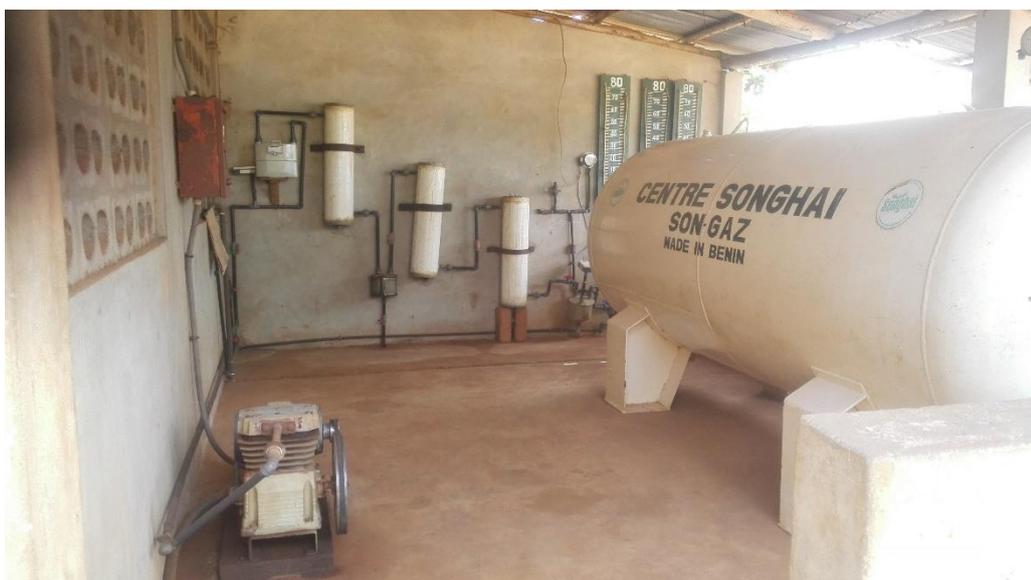


Figure 51 : Une des installations de traitement et de stockage du biogaz du centre Songhaï

La production obtenue avec 60 m³ de biodigester permet de produire 160 kWh d'électricité par jour. Les installations du centre sont de grosses tailles et mettent en jeu des puissances importantes (voir deux des générateurs sur la Figure 52). Malgré cela, l'ensemble est alimenté par des digesteurs à dôme fixe rudimentaires qui ne consomment aucune énergie en entrée (contrairement aux biodigesteurs industriels chauffés et parfaitement mélangés).



Figure 52 : Générateurs de 50 et de 31 kW présents au centre Songhaï de Porto-Novo

L'exemple du centre Songhaï met en évidence qu'à côté de leur emploi dans le contexte rural, les biodigesteurs rudimentaires peuvent également être utilisés comme source d'énergie pour des entités plus importantes comme des entreprises ou des industries et pour la production d'électricité.

9. CONCLUSION

Au-delà de la poursuite du développement des biodigesteurs du Centre Écologique Albert Schweitzer, ce travail aura permis d'élargir notre champ de vision sur l'étendue de ce qui existe déjà en matière de biogaz domestique et sur l'intégration de celui-ci aux différents contextes et cultures des pays du sud.

À la suite de nos investigations, nous avons appris à connaître le Programme National des Biodigesteurs du Burkina Faso et avons échangé à de nombreuses reprises avec lui. Cela nous a permis non seulement de mieux appréhender la technologie des digesteurs enterrés à dôme fixe ainsi que le rôle et le fonctionnement du PNB-Bf mais également de découvrir les nombreuses autres actions menées partout dans le monde pour le développement et la promotion du biogaz domestique soutenue entre autres par la SNV.

C'est également au travers de ces échanges que nous avons pris conscience plus sérieusement des limites et des contraintes intrinsèques à la production et à l'utilisation du biogaz. À partir de là, nous avons reconsidéré la question de l'intégration d'un biodigester sur le site de la clinique du docteur Bertrand Kaboré. Nous sommes arrivés à la conclusion que ce contexte permettait difficilement une utilisation bénéfique du biogaz et avons donc envisagé d'autres sources d'énergies renouvelables (notamment le photovoltaïque).

Forts de nos rencontres et de nos recherches, nous avons repris à bras le corps la poursuite des travaux de développement du CEAS Burkina. Afin de répondre aux objectifs fixés, nous avons entièrement revu la conception des biodigesteurs à base de barriques métalliques, ce qui a abouti à la réalisation d'un digester modulable de 1 m³. L'expérimentation de celui-ci s'est avérée très prometteuse. Son utilisation est aisée et son prix a pu être réduit par rapport aux précédents prototypes. De plus, nous avons obtenu une production constante et de bonne qualité. Cependant, les volumes de gaz produits (un peu plus de 100 litres par jour) restent insuffisants pour couvrir les besoins d'une famille.

Pour atteindre les performances des digesteurs enterrés, nous avons par la suite proposé une amélioration (la version 2.0) dont la production pourrait atteindre 300 litres par jour. Nous sommes persuadés qu'une fois réalisée et éprouvée, celle-ci sera fin prête à être vulgarisée et implantée sur le terrain.



Ensuite, une étude comparative des technologies a permis de mettre en évidence l'intérêt et la complémentarité du biodigesteur modulable par rapport au biodigesteur à dôme fixe. Celle-ci permet de confirmer la pertinence des recherches menées par le CEAS Burkina en matière de biogaz.

À côté du développement de biodigesteur, un premier système de stockage a également pu être réalisé. Celui-ci s'est avéré efficace et fonctionnel. Néanmoins, une amélioration pour simplifier son usage et une réduction drastique de son coût sont nécessaires. Les recherches dans ce domaine se doivent donc d'être poursuivies.

Pour terminer, le stage aura été l'occasion de découvrir une initiative analogue du côté du Bénin. L'université d'Abomey-Calavi tente, en effet, de développer un digesteur de surface principalement destiné aux cités lacustres mais à partir de polytanks cette fois. Nous avons tenté de leur apporter notre modeste expertise afin de résoudre les principaux problèmes soulevés. Cette rencontre a surtout permis de créer de nouveaux liens et de nouvelles collaborations entre les différents acteurs de la recherche dans le domaine du biogaz.

En conclusion, nous pouvons dire que ce travail et ce stage, de par la multiplicité des activités et des tâches réalisées, ont permis bien plus que de simples avancées dans les travaux de développement. Ils ont surtout élargi le regard que nous avons sur le biogaz domestique, son développement, son intégration et l'étendue de son implantation dans le monde. Toutes ces précieuses informations vont nous permettre plus que jamais de poursuivre de manière efficace, orientée et adaptée le développement et l'intégration des technologies liées au biogaz.

10. LISTE DES ABRÉVIATIONS

- ABER : Agence Nationale pour l'Électrification Rurale
- ABPP : Africa Biogas Partnership Programme (Programme de partenariat pour le biogaz en Afrique)
- ANEREE : Agence Nationale des Energies Renouvelable et de l'Efficacité Energétique
- CEAS : Centre Écologique Albert Schweitzer
- CEDEAO : Communauté Economique Des Etats d'Afrique de l'Ouest
- DESA : Département Environnement et Sécurité Alimentaire
- DRAI : Département Recherche Action et Innovation
- FBBD : Flexi bag biodigesteur (Biodigesteur en bâche)
- FDBD : Fixed dome biodigesteur (Biodigesteur à dôme fixe)
- FGBD : Fiberglass biodigesteur (Biodigesteur en fibre de verre)
- GES : Gaz à Effet de Serre
- GIZ : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Agence de coopération internationale allemande pour le développement)
- IDH : Indice de Développement Humain
- IRSAT : Institut de Recherche en sciences appliquées et technologies (Burkina Faso)
- ODD : Objectifs pour le Développement Durable
- OMD : Objectifs du Millénaire pour le Développement
- ONG : Organisation Non Gouvernementale
- ONU : Organisation des Nations Unies
- PIB : Produit Intérieur Brute
- PNB-Bf : Programme National des Biodigesteurs du Burkina Faso
- PNDES : Plan National de Développement Economique et Social
- PV : Photovoltaïque



PVD : Pays en Voie de Développement

RNB : Revenu National Brut

SNV : Stichting Nederlandse Vrijwilligers (il s'agit de l'organisation néerlandaise pour le développement)

SONABEL : SOCIÉTÉ NATIONALE BURKINABÉ DE L'ÉLECTRICITÉ

UAC : Université d'Abomey Calavi



11. RÉFÉRENCES

1. ABPP (page consultée le 15 mars 2018), *Africa Biogas Partnership Programme – Accueil*, <http://www.africabiogas.org/>
2. ABPP, PNB-Bf, SNV, MINISTRY OF FOREIGN AFFAIRS OF THE NETHERLANDS & HIVOS, *Éléments d'une feuille de route pour la mise en place de programmes nationaux biodigesteur dans chaque pays*, Burkina Faso, Programme ABPP, août 2017.
3. BANQUE AFRICAINE DE DEVELOPPEMENT & WWF, *Rapport sur l'empreinte écologique de l'Afrique*, Banque Africaine de développement & WWF, mai 2012.
4. BOURGUIGNON (C. & L.), *Le sol, la terre et les champs – Pour retrouver une agriculture saine*, Paris, Sang de la Terre, juin 2015.
5. CENTRE ECOLOGIQUE ALBERT SCHWEITZER SUISSE (page consultée le 8 mars 2018), *CEAS – Accueil*, <http://www.ceas.ch/fr>
6. CENTRE ECOLOGIQUE ALBERT SCHWEITZER BURKINA (page consultée le 6 mars 2018), *CEAS Burkina – Accueil*, <http://www.ceas-burkina.org/>
7. CENTRE RÉGIONAL SONGHAÏ, *Guide pratique du biogaz*, Porto-Novo, Édition Songhaï, 2014.
8. CHARLIER (C.), *Chimie industrielle durable : introduction et procédés*, Institut Gramme de Liège, 2017.
9. DEBOUGNOUX (J.), MISSE (K.) & PAQUAY (Y.), *Développement de projet basé sur les énergies renouvelables – Système de stockage de biogaz*, HELMo-Gramme (section Génie Energétique Durable), 2017.
10. DOMANSKI (L.), HAUSMAN (B.) & LEFEBVRE (J.), *Poursuite du développement de digesteurs à biogaz au sein de l'Institut Gramme*, HELMo-Gramme (section Génie Energétique Durable), 2017.
11. GROUPE DE LA BANQUE MONDIALE (page consultée le 6 mars 2018), *Données – Burkina Faso*, <https://donnees.banquemondiale.org/pays/burkina-faso>
12. HIVOS (page consultée le 16 mars 2018), *Africa Biogas Partnership Programme*, <https://hivos.org/activity/africa-biogas-partnership-programme>



13. INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE ET DE LA DEMOGRAPHIE (page consultée le 6 mars 2018), *Statistiques démographiques et sociales*, <http://www.insd.bf/n/index.php/indicateurs/22-les-indicateurs/demographie-et-sociale/61-statistiques-demographiques-et-sociales>
14. NGOGA (E.), *Suivi du fonctionnement des digesteurs domestiques au Rwanda*, Arlon, Université de Liège, Département des sciences et gestion de l'environnement, mémoire inédit (présenté en vue de l'obtention du grade de master en sciences et gestion de l'environnement, option énergie-environnement), 2011.
15. NZAMUJO (G.), *Songhai. L'Afrique maintenant !*, Paris, Les éditions du cerf, janvier 2016.
16. ONU (page consultée le 15 mars 2018), *Éliminer la pauvreté c'est possible – Objectifs du millénaire pour le développement et l'après 2015*, <http://www.un.org/fr/millenniumgoals/>
17. PERSPECTIVE MONDE (page consultée le 6 mars 2018), *Population urbaine (% de la population totale) Burkina Faso*, <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/BFA/fr/SP.URB.TOTL.IN.ZS.html>
18. PNB-Bf, *Conférence internationale sur la technologie du biodigester – Rapport général*, Ouagadougou, PNB-Bf, novembre 2017.
19. PROGRAMME NATIONAL DES BIODIGESTEURS DU BURKINA FASO (page consultée le 6 mars 2018), *PNB-Bf – Accueil*, <http://www.pnb-bf.org/>
20. RWIGEMA (A.), *A scientific comparative performance study of fixed dome masonry, fiber glass and flexbag biodigesters in Rwanda – Final report*, Kigali, Université du Rwanda, Département des sciences et technologies, 2015.
21. SNV (page consultée le 15 mars 2018), *Africa Biogas Partnership Programme (ABPP)*, <http://www.snv.org/project/africa-biogas-partnership-programme-abpp>
22. SNV & PPRE, *Compact course on Domestic Biogas Technology and mass dissemination*, version Avril 2017, University of Oldenburg, 2017.
23. WARNARS (L.) & OPPENOORTH (H.), *L'effluent: engrais par excellence ! – Une étude sur les résultats et les utilisations de l'effluent*, Hivos, février 2014.
24. WIKIPEDIA (page consultée le 6 mars 2017), *Burkina Faso*, https://fr.wikipedia.org/wiki/Burkina_Faso



25. ZIMMERMANN (N.), *Contribution au développement d'une installation de biométhanisation adaptée à l'utilisation rurale au Burkina Faso*, Liège, HELMO-Gramme, mémoire inédit (présenté en vue de l'obtention du grade de master en sciences de l'ingénieur industriel, finalité industrie), 2017.



12. ANNEXES

12.1. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES DIGESTEURS DU PNB-BF

Dénomination digesteur	Volume utile du digesteur (m ³)	Volume du stockage de gaz (m ³)	Quantité de bouse disponible (kg)	Production journalière de gaz (Nm ³ /j)
4 m ³	3	0,9	25 – 38	1 - 1,5
6 m ³	4,5	1,35	38 – 56	1,5 - 2,25
8m ³	6,75	2	56 – 84	2,25 - 3,38
10 m ³	10	3	84 – 127	3,38 - 5

Source : Réf. 22.

12.2. FICHE TECHNIQUE DU COMPTEUR À GAZ RÉSIDENTIEL GALLUS

Gaz

Itron

Knowledge to Shape Your Future

GALLUS

Compteur résidentiel de gaz à membranes

Le GALLUS est un compteur résidentiel de gaz compact, conçu pour le comptage précis de volume de gaz naturel, de GPL et de tous les gaz non corrosifs.

Application

Le GALLUS, avec plus de 30 millions d'unités installées, est un compteur universel satisfaisant de nombreux distributeurs de gaz dans le monde.

Métrologie

Le GALLUS répond aux recommandations O.I.M.L., à la norme EN 1359, à la directive MID (certificat délivré par le LNE) et à plus de 25 standards métrologiques nationaux (DVGW, NMI Classe 1,...).

La définition et le choix soigné des matériaux font du GALLUS une solution parfaite face aux demandes internationales les plus exigeantes en terme de précision et de stabilité à long terme.

Tous les compteurs sont testés à Q_{min} , $0,2 Q_{max}$ et Q_{max} pendant les essais préliminaires effectués sur les bancs de test à tuyères soniques.

Principe de fonctionnement

Le GALLUS est un compteur de gaz à membranes à déplacement positif, équipé d'un groupe mesureur autonome à deux chambres.

Les deux chambres comportent chacune une membrane souple et étanche qui se déplace en fonction du différentiel de pression amont/aval. Le gaz entre dans une chambre du premier compartiment et sort par l'autre via un système collecteur tiroir. Dès qu'une chambre est pleine, le tiroir rotatif passe à la position suivante, permettant au gaz de remplir l'autre chambre.

Par l'intermédiaire d'un engrenage de transmission et d'un couple mécanique ou un presse-étoupe, le mouvement est transmis au totalisateur mécanique.

Le groupe mesureur est installé dans une enveloppe robuste et étanche.



> GALLUS (approuvé MID)
Version acier

> Caractéristiques de base

- Compact
- Volume cyclique de $1,2 \text{ dm}^3$
- Calibre G1.6, G2.5, G4
- Conformité aux normes EN 1359 et O.I.M.L.

> Conception

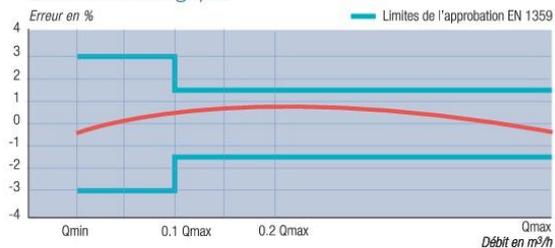
- Précision et sécurité à long terme
- Équipé pour le relevé et la gestion des données à distance

> Qualité

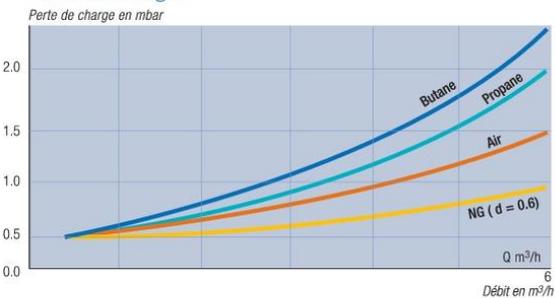
- Certifié ISO 9001, fabrication européenne.

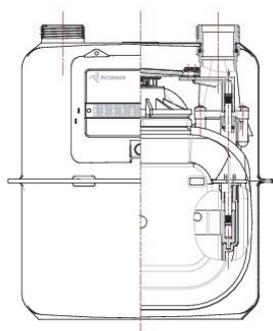
www.itron.com

Courbe métrologique



Perte de charge





Construction

> Caisse

La caisse acier est protégée contre la corrosion par un traitement cathodique (test au brouillard salin pendant 500 heures).

La caisse aluminium supporte jusqu'à 1000 heures de test au brouillard salin.

L'extrême résistance du joint de caisse est obtenue par laminage de la ceinture et compression des brides en contact avec un enduit étanche appliqué entre les deux faces.

Il est ainsi créé un joint à la fois étanche pour le gaz et résistant au feu.

> Unité de mesure

La réalisation d'un mécanisme à course fixe est le résultat d'une automatisation de précision et de haute qualité, éliminant la nécessité d'ajustement. Ceci confine tous les ajustements d'enregistrement aux roues de correction accessibles sous l'indicateur.

Des membranes synthétiques de longue durée de vie, combinées à un modèle de mouvement éprouvé, offrent une excellente stabilité et une grande précision durant toute la vie du compteur.

Tous les matériaux ont été sélectionnés pour leur haute résistance chimique et au gaz. La boîte et le tiroir, grâce à une formule spéciale de bakélite, offrent de hautes propriétés de glissement, ce qui les protège contre une usure prématurée.

Finalement, un dispositif anti-retour empêche le passage du gaz en sens inverse.

> Index

Les compteurs sont compatibles "m3" ou "ft3". Ils sont équipés d'un aimant permanent pour générer les impulsions et permettent l'installation ultérieure d'un émetteur BF. Pour les environnements spécifiques, des versions IP54 et IP67 sont disponibles.

Assurance de la qualité

Les procédures d'assurance de la qualité – telles que l'ISO 9001 – et les contrôles stricts tout au long du processus de fabrication assurent un très haut niveau de qualité.

Caractéristiques techniques

Type de gaz	Gaz naturel, GPL et tous gaz non corrosifs
Volume cyclique	1,2 dm ³
Température de service	- 25°C à + 55°C
Température de stockage	- 30°C à + 70°C
Pression de service maxi.	Version acier : 0,5 bar Version aluminium : 1,5 bar
Étendue de mesure	G1.6 Qmin 0,016 m ³ /h Qmax 2,5 m ³ /h
	G2.5 Qmin 0,025 m ³ /h Qmax 4 m ³ /h
	G4 Qmin 0,04 m ³ /h Qmax 6 m ³ /h
Générateur d'impulsions	Standard : 0,01 m ³ /impulsion En option : 0,1 m ³ /impulsion
Émetteur d'impulsions	Émetteur BF rétrofitable, 12 V cc maxi. – 10 mA maxi., standard : 0,01 m ³ /impulsion Compression par fil prise jack ou bloc connecteur
Couleur	RAL 9002

Encombrement

Enveloppe	A mm	B mm	C mm	D mm	E mm	Poids kg	Filetage des raccords selon l'ISO 228
Acier	Co-axial	230	67	190	152 ±4	1.45	DN 25
	100	212 ±2	67	190	156	1.45	DN 20 - G 1" - G 3/4" - G 1 1/4" - G 7/8" - BS 1" - BS 3/4"
	110	219 ±9	67	190	156	1.45	
	130	225	80	240	156	1.6	G 1 1/4"
	6"	240	80	240	156	1.6	BS 1"
	160	225 ±2	80	240	156	1.6	DN 20 - G 1" - G 3/4" - G 7/8"
Aluminium	220	270	72	283	170	2.6	G 3/4"
	250	259	78	331	178	2.65	G 1" 1/4"
	110	219	77	196	177	2.20	G 3/4" - G 1" - G 1 1/4"
	6"	232	72	219	167	2	G 3/4" - G 1" - G 1 1/4"

Nous consulter pour toute autre demande.

Versions et options

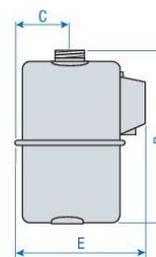
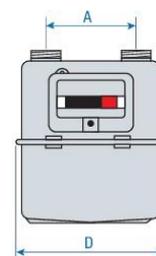
- > Version aluminium
- > Version GPL
- > Version prépaiement
- > Version Asie
- > Version Amérique du sud
- > Emetteur BF rétrofitable
- > Relevé automatique des compteurs par radio ou réseau téléphonique

Accessoires

Support de compteur mural pour les versions bi-tubulaires

Robinets, raccords, montage en coffret

Détendeurs domestiques et clapets de sécurité



> GALLUS



> GALLUS version aluminium



> GALLUS version Asie



> GALLUS version Amérique du Sud

Informations nécessaires à la commande

- Plage de mesure (G1.6, G2.5, G4)
- Pression maximum (0,5-1-1,5 bar)
- Entraxe et type de raccordement
- Marquage spécifique (numéro de série, logo, code barres)

A propos d'Itron Inc.

Itron Inc. est l'un des plus grands fournisseurs de technologies pour le secteur de l'énergie et de l'eau. Nous sommes leader mondial en matière de comptage, de collecte de données et de logiciels spécifiques pour la distribution d'énergie. Près de 8 000 services de distribution d'énergie dans le monde entier reposent sur notre technologie pour optimiser leur fourniture et leur utilisation de l'eau et de l'énergie. Nos produits : compteurs d'électricité, de gaz et d'eau, systèmes de collecte de données et de communication - y compris le relevé automatique des compteurs et les infrastructures de comptage avancées -, applications de gestion des données des compteurs et logiciels correspondants, gestion de projets, installation et conseil. Pour en savoir plus, rendez-vous sur : www.itron.com

Pour plus d'informations, contactez votre agence ou votre agent commercial local.



Itron France
Rue Chrétien de Troyes
ZAC Val de Murigny - BP 327
51061 Reims - France
Phone: +33 (0)3 26 05 65 00
Fax: +33 (0)3 25 05 65 96
www.itron.com

© Copyright 2010, Itron. Tous droits réservés. Itron se réserve le droit de modifier ce document sans préavis.

GA-GALLUS-FR-V1.0-2010.07



12.3. CALCUL D'ERREUR SUR LE VOLUME DE GAZ CONSOMMÉ ET PRODUIT

Pour commencer, nous avons déterminé l'erreur sur chaque mesure effectuée. Premièrement, nous mesurons les 2 périmètres (grand et petit) des 2 chambres à air. Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un mètre ruban dont la précision est de 1 cm. Ensuite, nous relevons également la température ambiante à l'aide d'un thermomètre classique dont la précision est de 1°C et la pression au sein des chambres à air à l'aide d'un manomètre dont la précision est de 0,5 kPa. Pour terminer, nous devons déterminer le volume lorsque les chambres à air sont vidées au maximum. Ce volume est estimé à l'aide d'un récipient. Sur cette mesure, nous avons considéré une erreur de 5 litres.

Liste des mesures et des erreurs commises :

Donnée mesurée	Symbole	Unité	Erreur de mesure
Petit périmètre chambre à air 1	p1	m	0,01 m
Grand périmètre chambre à air 1	P1	m	0,01 m
Petit périmètre chambre à air 2	p2	m	0,01 m
Grand périmètre chambre à air 2	P2	m	0,01 m
Température ambiante	T	K	1 K
Pression interne	P	Pa	500 Pa
Volume des 2 chambres à air vides	V ₀	m ³	0,005 m ³

Ci-dessous sont décrites les différentes étapes du calcul d'erreur.

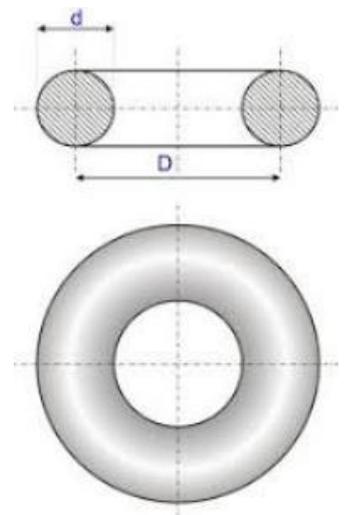
Tout d'abord, nous calculons les 2 rayons des chambres à air (en forme de tore) sur base des périmètres que nous avons mesurés car c'est de ceux-ci dont nous aurons besoin dans la suite du calcul.

$$r = \frac{d}{2} = \frac{p}{2\pi}$$

$$\Delta r = \left| \frac{\Delta p}{2\pi} \right|$$

$$R = \frac{D}{2} = \frac{P}{2\pi} - r = \frac{P}{2\pi} - \frac{p}{2\pi}$$

$$\Delta R = \left| \frac{\Delta P}{2\pi} \right| + \left| \frac{\Delta p}{2\pi} \right|$$



Ici le calcul d'erreur se fait entièrement sur base des erreurs absolues. Il est donc possible de déterminer directement l'erreur absolue sur les rayons à partir des erreurs de mesure sur les périmètres. Ce sont ces dernières qui seront reprises dans la suite du calcul.

Donnée calculée	Symbole	Unité	Erreur absolue
Petit rayon du tore	r	m	0,0016 m
Grand Rayon du tore	R	m	0,0032 m

Sur base des rayons uniquement, il est possible de déterminer le volume d'un tore à l'aide de la formule suivante :

$$V = 2\pi^2 r^2 R$$

Cette formule étant un produit, l'erreur relative sur le volume se calcule à partir des erreurs relatives de chaque terme selon l'expression suivante :

$$\left| \frac{\Delta V}{V} \right| = 2 \left| \frac{\Delta r}{r} \right| + \left| \frac{\Delta R}{R} \right|$$

Il y a deux chambres à air, l'erreur sur le volume total sera donc la somme des erreurs absolues sur le volume de chaque chambre à air :

$$V_{tot} = V_1 + V_2$$

$$|\Delta V_{tot}| = |\Delta V_1| + |\Delta V_2|$$

À ce stade, nous connaissons le volume des deux chambres à air ainsi que son erreur. Il faut maintenant déterminer le volume normal afin de soustraire l'influence de la température et de la pression sur notre mesure. Cela se fait à l'aide de la loi des gaz parfaits :

$$V_{normal} = V_{tot} * \frac{P}{P_{normal}} * \frac{T_{normal}}{T} = V_{tot} * \frac{P}{101325} * \frac{273,15}{T}$$

Encore une fois, la formule est un produit-quotient. L'erreur se calcule donc via les erreurs relatives :

$$\left| \frac{\Delta V_{normal}}{V_{normal}} \right| = \left| \frac{\Delta V}{V} \right| + \left| \frac{\Delta P}{P} \right| + \left| \frac{\Delta T}{T} \right|$$



La dernière étape pour obtenir le volume de gaz produit ou consommé est de soustraire au volume total normal le volume lorsque les chambres à air sont vides :

$$V_{prod-conso} = V_{normal} - V_0$$

Cette formule étant une différence, les erreurs absolues s'additionnent :

$$|\Delta V_{prod-conso}| = |\Delta V_{normal}| + |\Delta V_0|$$

L'ensemble de ces étapes de calcul ont été implémentées dans une feuille de calcul afin de déterminer l'erreur sur chaque donnée recueillie au cours des expériences. Les mesures réalisées pour quantifier la production du digesteur modulable et la consommation lors des essais de cuisson sont en réalité les mêmes.

Les erreurs relatives sur ces mesures varient entre 5,25% et 6,85% avec une moyenne de 6%. Cela représente une erreur absolue qui va de 20 à 25 litres. Nous avons considéré ces erreurs acceptables. La méthode utilisée nous a donc permis de déterminer la quantité de gaz recherché à 6% près.



12.4. DIMENSIONNEMENT DU PROTOTYPE DE DIGESTEUR MODULABLE

Le dimensionnement d'un digesteur consiste à déterminer les caractéristiques que celui-ci doit avoir pour être adapté à une situation particulière. Dans le contexte des digesteurs domestiques ruraux, le paramètre clé de dimensionnement est la quantité de substrat disponible. Dans le cas du prototype du CEAS Burkina, la bouse est achetée et ne constitue pas le facteur limitant. Un dimensionnement inverse a donc été réalisé, c'est-à-dire, déterminer la quantité de bouse nécessaire pour une configuration donnée. La figure ci-dessous représente le schéma général d'un digesteur modulable tel que conçu au CEAS Burkina.

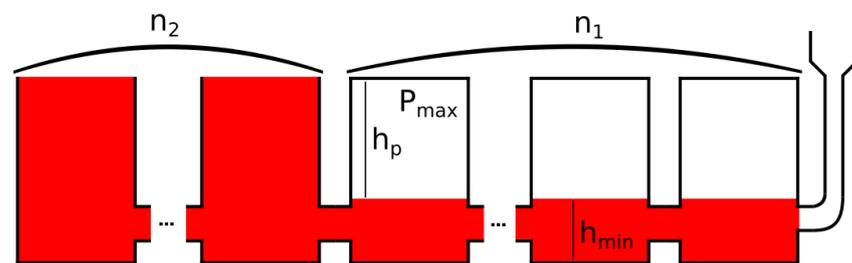


Figure 53 : Schéma générale d'un digesteur modulable lorsque la pression interne est maximale

Le choix de départ a été de construire un digesteur de 1 m^3 afin qu'il ait la même dimension que le digesteur existant. Cela facilite la comparaison. Le digesteur sera donc composé de 5 barriques ($n_1 = 5$) auxquelles s'ajoute une barrique de compensation ($n_2 = 1$).

Un deuxième choix arbitraire doit être fait, c'est celui de la pression maximale de sortie souhaitée. Celle-ci est directement liée à la différence de niveau entre les cuves de digestion et le bassin de compensation (h_p sur la Figure 53). Elle doit être suffisamment élevée pour permettre l'utilisation et le stockage du gaz. Cependant, plus la différence de hauteur h_p est grande, plus la capacité du digesteur pour la production est réduite. La hauteur totale de la cuve est de 87 cm. La géométrie de la cuve impose donc que la valeur de h_p soit comprise entre 0 et 87 cm. Nous avons choisi de la fixer à 60 cm, ce qui permet une pression interne maximale de 60 mbars (suffisante pour l'utilisation).

Connaissant h_p , par déduction, nous calculons la hauteur minimum de substrat dans le digesteur.

$$h_{min} = 87 - h_p = 27 \text{ cm}$$

Cette hauteur va déterminer la position des tuyaux de jonction des cuves. Ceux-ci doivent être placés le plus haut possible afin de retenir la matière organique qui se trouve dans le fond des cuves. Mais ils doivent impérativement se situer sous le niveau h_{min} sous peine de voir le gaz s'échapper. Nous avons donc décidé que le dessus des tuyaux se situerait à 24,5 cm du bas des fûts afin d'avoir une petite marge de sécurité.

Connaissant le niveau h_{min} , il est possible de déterminer le volume de substrat totale contenu dans le digesteur.

$$V_{tot} = \left(n1 * \frac{\pi D^2}{4} * h_{min} \right) + \left(n2 * \frac{\pi D^2}{4} * h_{tot} \right)$$

$$V_{tot} = \left(5 * \frac{\pi 0,57^2}{4} * 0,27 \right) + \left(1 * \frac{\pi 0,57^2}{4} * 0,87 \right) = 0,566 \text{ m}^3$$

Ce volume représente la quantité de matière qui devra se trouver en permanence dans le dispositif afin que la pression puisse atteindre 60 mbars et que le gaz ne puisse pas s'échapper. Sur base de ce volume, il est possible de calculer la hauteur maximale dans les fûts (h_{max} sur la figure suivante).

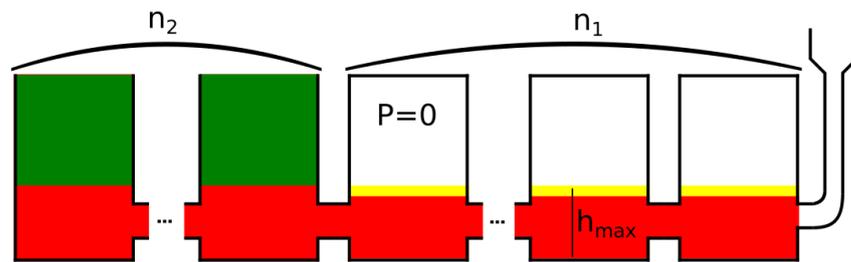


Figure 54 : Schéma générale d'un digesteur modulaire lorsque la pression interne est égale à la pression atmosphérique

$$h_{max} = \frac{V_{tot}}{(n1 + n2) * \frac{\pi D^2}{4}} = \frac{0,566}{(5 + 1) * \frac{\pi 0,57^2}{4}} = 0,37 \text{ m}$$

Après avoir déterminé le volume total de matière et les différents niveaux, il est nécessaire de déterminer le volume utile du digesteur. En effet, seule la matière située dans les 5 cuves de digestion produit du biogaz. Le volume utile est donc défini comme le volume total diminué du volume de compensation. Comme les niveaux varient et qu'il y a des transferts de matière

entre le bassin de compensation et le digesteur⁶⁵, le volume utile est lui aussi variable. On calcule donc un volume utile maximum et minimum.

$$V_{U_{min}} = V_{tot} - n2 * \frac{\pi D^2}{4} * h_{tot} = 0,566 - 1 * \frac{\pi 0,57^2}{4} * 0,87 = 0,344 \text{ m}^3$$

$$V_{U_{max}} = V_{tot} - n2 * \frac{\pi D^2}{4} * h_{max} = 0,566 - 1 * \frac{\pi 0,57^2}{4} * 0,37 = 0,472 \text{ m}^3$$

En faisant l'hypothèse que la durée où le volume est au maximum est égale à la durée où le volume est au minimum, on peut prendre comme référence pour la suite des calculs le volume utile moyen.

$$V_{u_{moy}} = \frac{V_{U_{min}} + V_{U_{max}}}{2} = 0,408 \text{ m}^3$$

Ce volume participe au processus de méthanisation. Sur base de celui-ci, il est possible de déterminer l'alimentation nécessaire. Pour ce faire, il faut connaître le temps de rétention hydraulique. Ce dernier varie entre 40 et 60 jours pour de la bouse de vache en régime mésophile. Repartant de la définition du temps de rétention hydraulique (Equation 1, p. 25), nous déterminons l'alimentation minimum et maximum.

$$Q_{min} = \frac{V_{u_{moy}}}{HRT_{max}} = \frac{408}{60} = 6,8 \text{ l/j}$$

$$Q_{max} = \frac{V_{u_{moy}}}{HRT_{min}} = \frac{408}{40} = 10,2 \text{ l/j}$$

La disponibilité en bouse de vache découle directement de l'alimentation. Elle dépend également du rapport de dilution. Dans notre cas, il est de 2:1. La quantité de bouse nécessaire vaut donc tout simplement un tiers des alimentations ci-dessus, soit de 2,3 à 3,4 litres par jour.

Connaissant la quantité de bouse méthanisée chaque jour, nous pouvons calculer la production théorique de biogaz. Cela se fait à l'aide de potentiel méthanogène du substrat utilisé. Dans notre cas, la littérature annonce un potentiel de production de 40 litres de biogaz par kg de bouse de vache et par jour de digestion.

⁶⁵ Il est à noter que le volume représenté en vert sur la Figure 54 et celui représenté en jaune sont égaux.

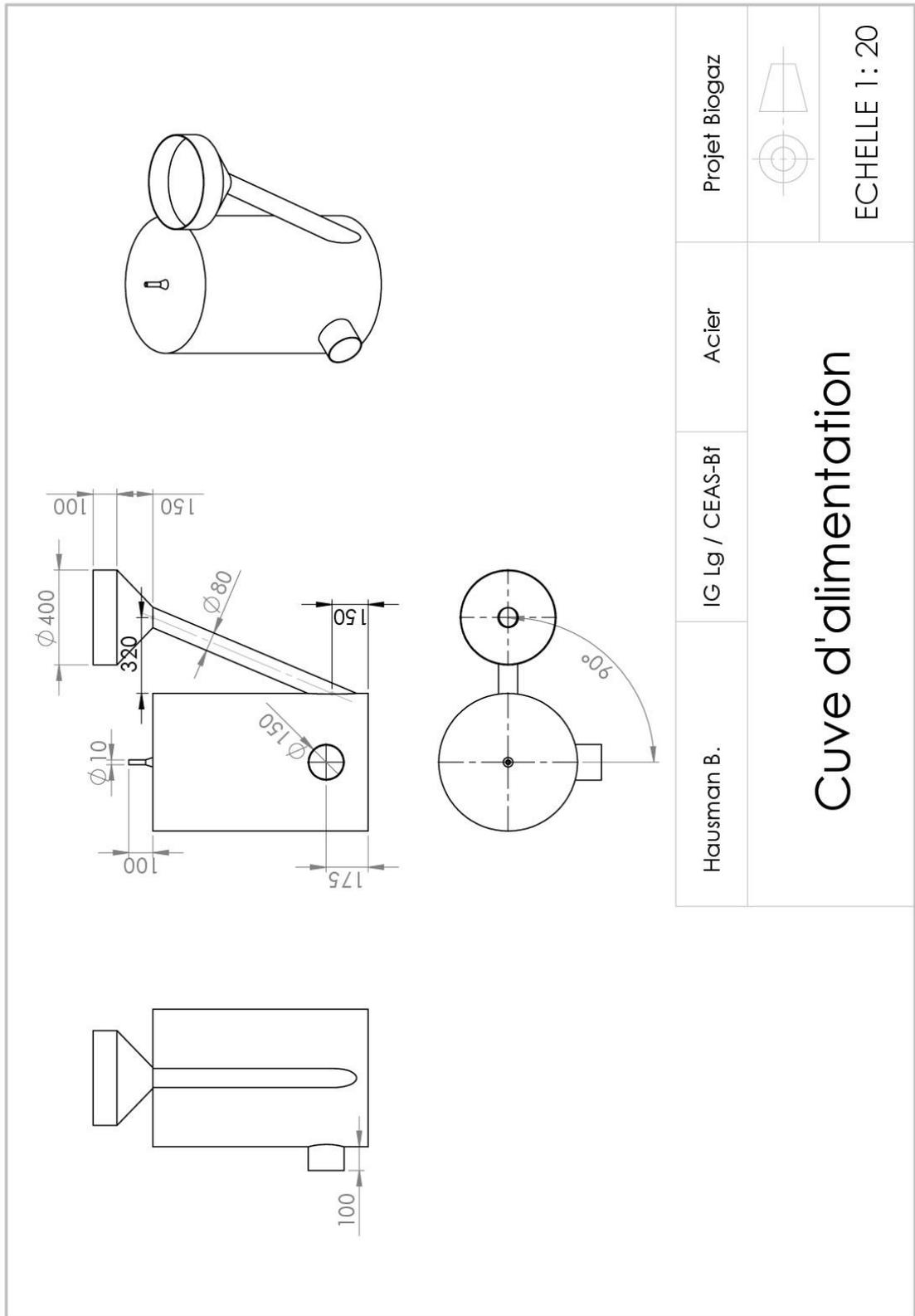
$$Prod_{min} = 40 * Q_{min} = 276 \text{ litres/jour}$$

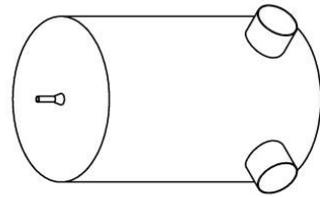
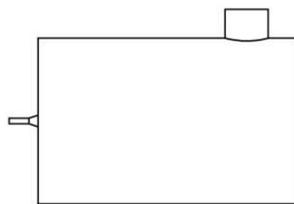
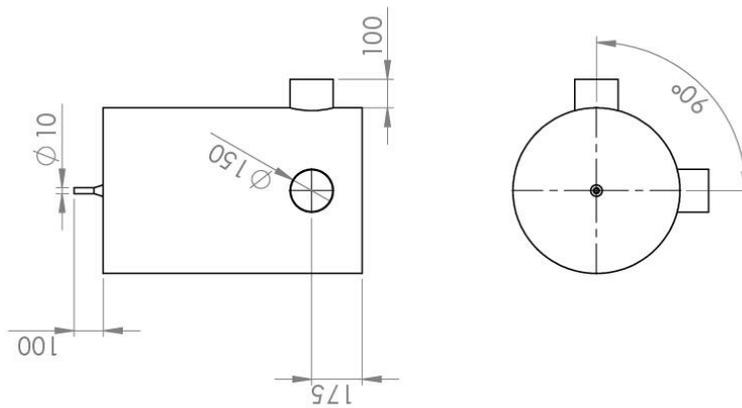
$$Prod_{max} = 40 * Q_{max} = 408 \text{ litres/jour}$$

De cette manière, nous pouvons prédire le fonctionnement et les performances de notre digesteur une fois le régime stationnaire atteint.

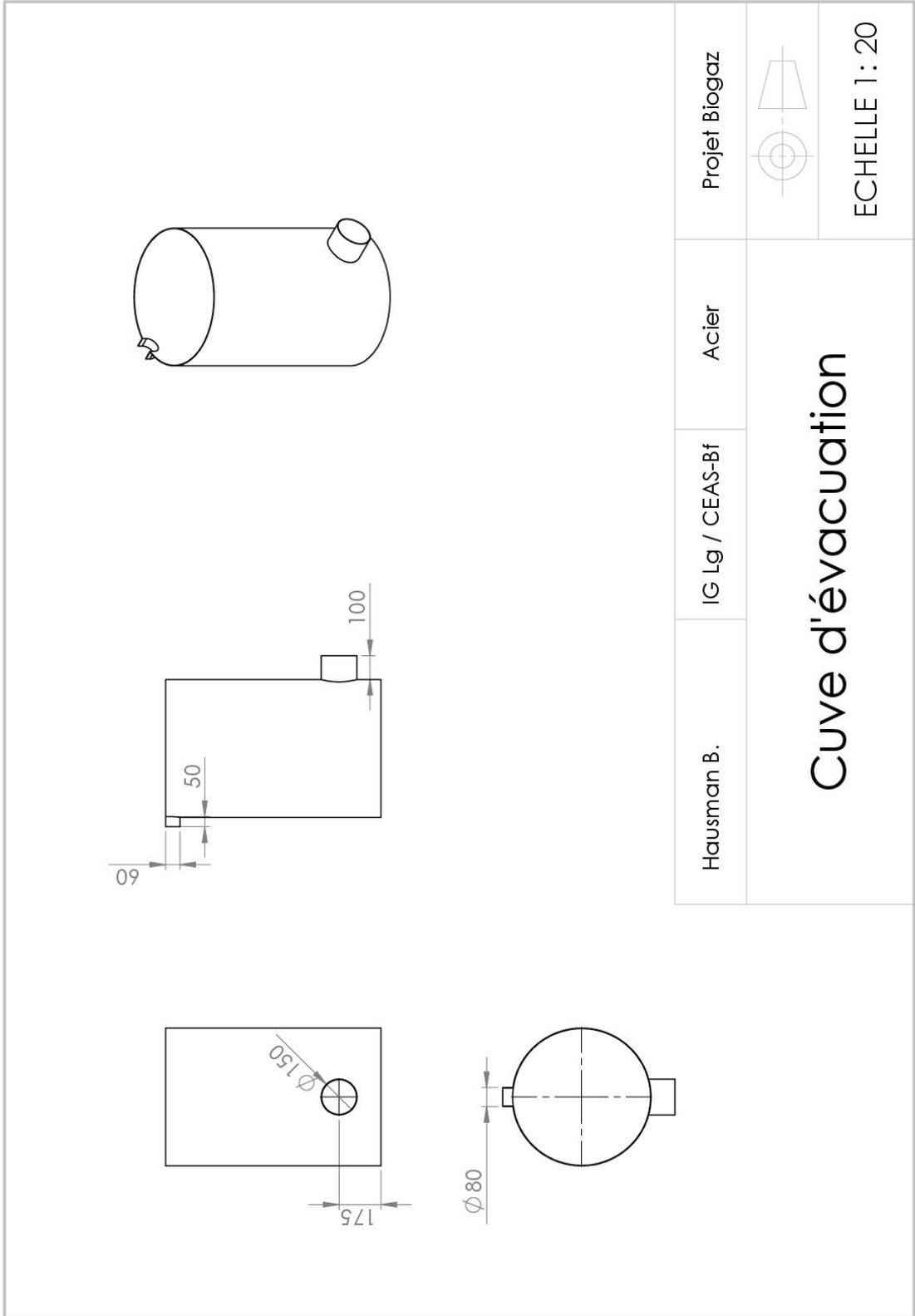


12.5. PLANS DE FABRICATION DES CUVES DU DIGESTEUR MODULABLE



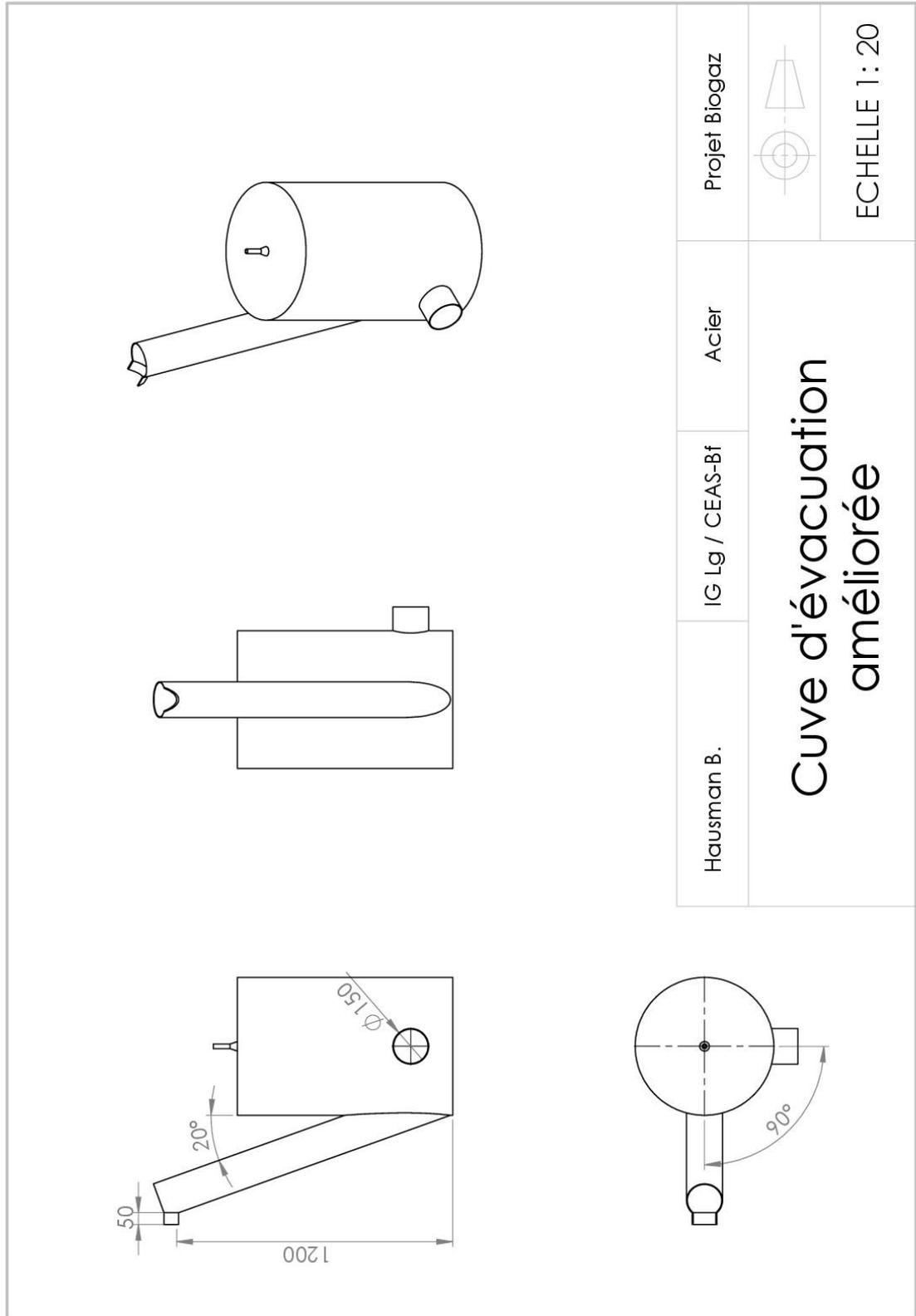


Hausman B.	IG Lg / CEAS-Bf	Acier	Projet Biogaz
<h1>Cuve Module</h1>			
			ECHELLE 1:20

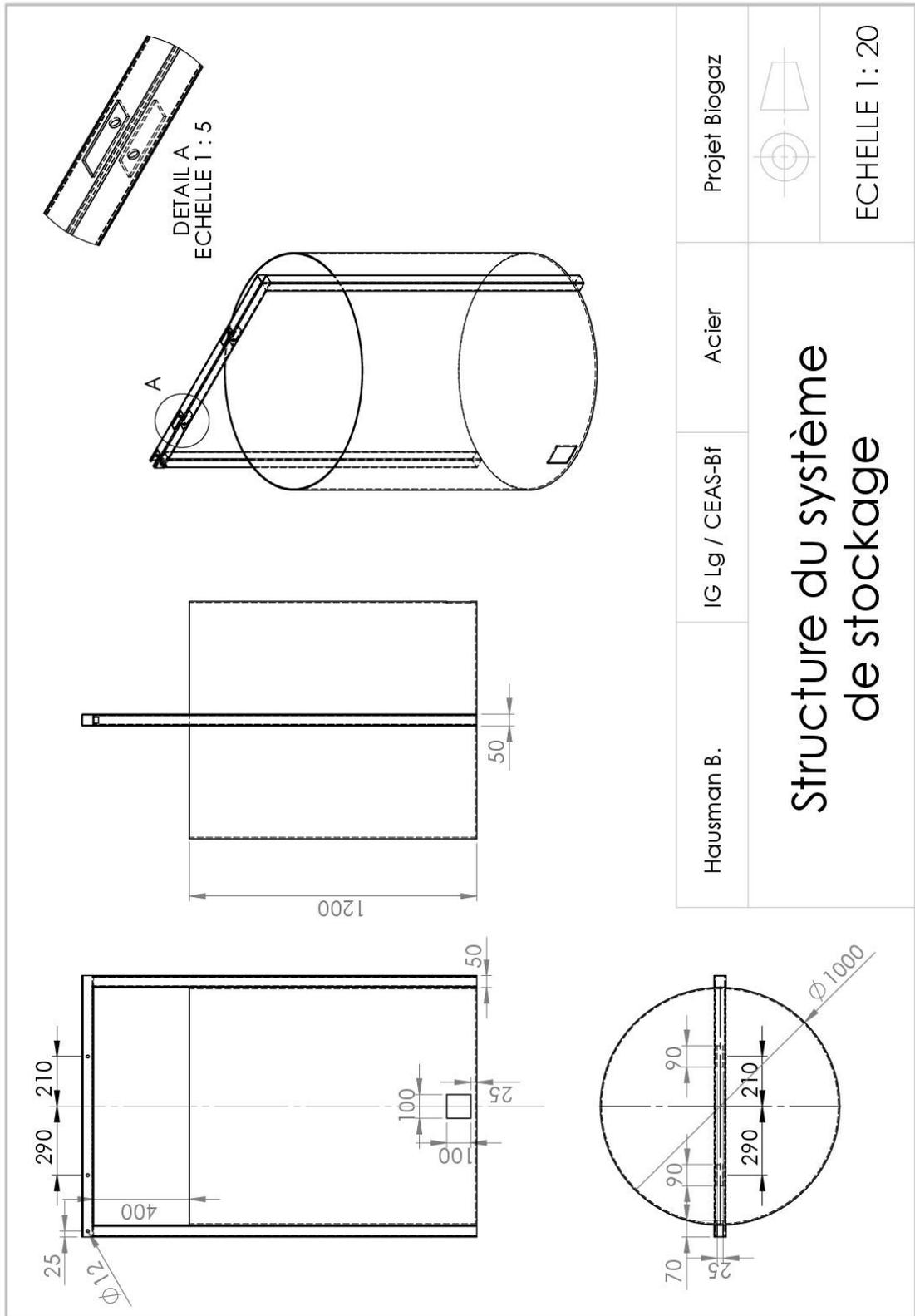


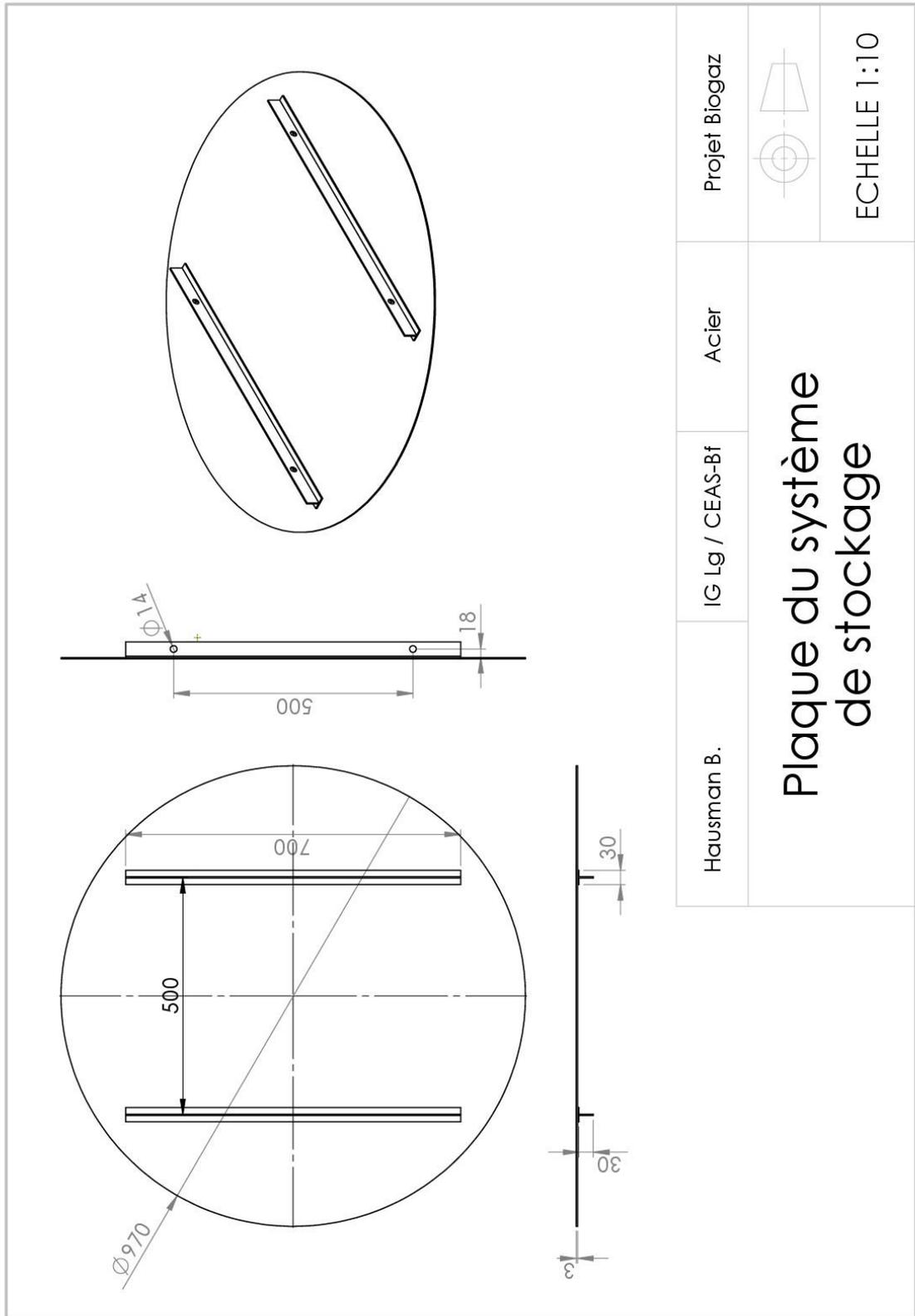
Hausman B.	IG Lg / CEAS-Bf	Acier	Projet Biogaz
<h1>Cuve d'évacuation</h1>			
			ECHELLE 1:20

12.6. PLANS DE FABRICATION DU DIGESTEUR MODULABLE 2.0



12.7. PLANS DE FABRICATION DU SYSTÈME DE STOCKAGE





12.8. PRÉDIMENSIONNEMENT DU DIGESTEUR À POLYTANK

Le dimensionnement du digesteur polytank est similaire à celui du digesteur modulable. Le volume total du digesteur est déterminé en fonction du choix de polytanks qui est fait. L'UAC a choisi de travailler avec des tanks de 2000 litres. En réalité, pour le dimensionnement, il s'agit principalement de fixer les niveaux de fonctionnement (voir Figure 55) afin de déterminer le volume utile et la quantité de substrat nécessaire pour l'alimentation.

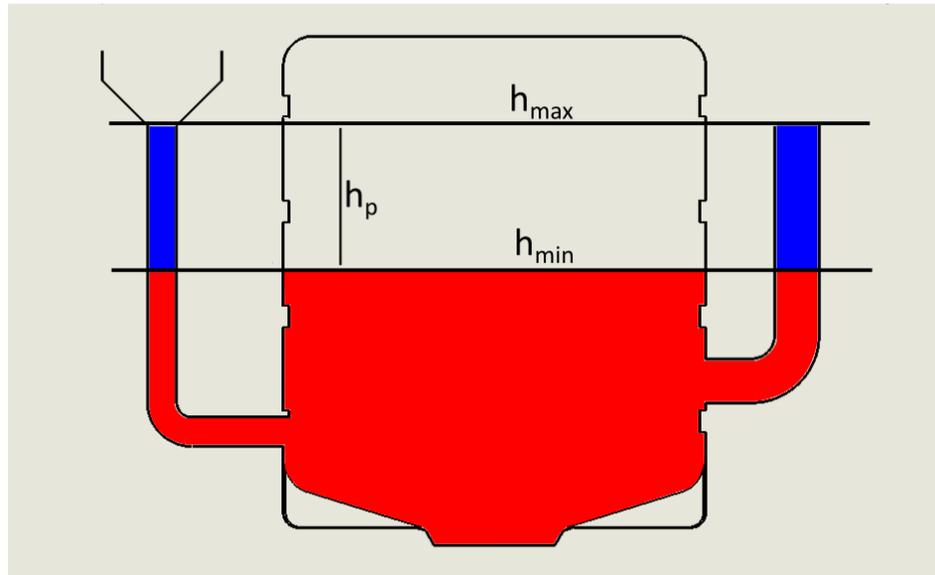


Figure 55 : Schéma du digesteur à polytank

En pratique, il faut trouver un compromis entre maximiser le volume utile mais tout de même garder une utilisation aisée. Dans le cas du digesteur étudié, le polytank pourrait être complètement rempli. Il suffirait d'augmenter la hauteur des tuyaux d'alimentation et d'évacuation. Cependant, si l'on veut garder le digesteur en surface, l'augmentation de la hauteur risque de compliquer énormément l'utilisation du digesteur car les canaux ne seront plus accessibles depuis le sol.

Le paramètre clé est donc la hauteur maximale de l'entonnoir à ne pas dépasser afin que le remplissage soit aisé. Nous avons fixé cette hauteur à 1,65 m. Un homme peut facilement soulever un seau au-dessus de sa tête. De là découle toutes les autres hauteurs. Le niveau h_{max} (voir figure) est fixé à 1,4 m car l'entonnoir fait 25 cm de haut. La différence de niveau doit être au minimum de 60 cm afin d'assurer une pression de sortie maximum de 60 mbars. Dès

lors, le niveau minimum (h_{\min}) est fixé à 80 cm (approximativement la moitié de la hauteur totale de la cuve).

La principale différence avec le digesteur modulable est qu'ici il n'y a plus de bassin de compensation. De cette manière la variation de niveau à l'intérieur du digesteur est négligeable ce qui facilite grandement les calculs.

Le volume utile du digesteur vaut donc le volume de substrat. Avec un niveau de remplissage fixé à 80 cm, la cuve est à moitié remplie. Dans le cas d'un polytank de 2000 litres, le volume utile sera donc de 1 m³. Si le temps de séjour est de 40 jours et que le rapport de dilution est de 1:1, l'alimentation journalière en substrat devra être de 25 kg (soit 12,5 kg de bouse). La production peut donc être calculée sur base du potentiel méthanogène.

$$Production = 12,5 * 40 = 500L/j$$

Un tel biodigesteur, une fois en régime stationnaire, sera donc capable de produire près de 500 litres de biogaz par jour.



12.9. PLANS DU DIGESTEUR À POLYTANK

