

REPIC

CH – 1717 ST. URSEN

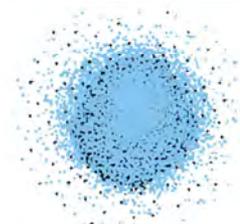
Production de biogaz à partir de biodéchets des ménages et de Jacinthes d'eau pour les usages domestiques des populations de la commune de Sô-Ava, au Bénin

RAPPORT INTERMEDIAIRE

N° de document : 15-4201-AM

Version 1.0

Le 16 octobre 2015



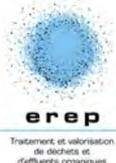
erép

Traitement et valorisation
de déchets et
d'effluents organiques



Donald HOUSSOU
ACED
BP 660
ABOMEY-CALAVI – Bénin

contact@aced-benin.org
www.aced-benin.org



Adèle MOTTET
EREP SA
Chemin du Coteau 28
1123 ACLENS – Suisse
Tél. : +41 21 869 98 87
info@erep.ch
www.erep.ch

SOMMAIRE

Bibliographie	3
Introduction	5
1. Caractérisation du territoire	7
1.1. Le lac Nokoué	7
1.2. Sô-Ava	8
2. Définition d'une installation de biogaz	10
3. Caractérisation des flux / Paramètres de terrain / mode de collecte	11
3.1. Jacinthes d'eau	11
3.2. Biodéchets des ménages	12
3.3. Demande en biogaz	14
3.4. Digestat	17
4. Site(s) d'implantation de l'installation de biogaz	18
5. Dimensionnement de l'installation de biogaz	21
5.1. Choix du type de digesteur	21
5.1.1. Le digesteur Chinois ou « à dôme fixe »	21
5.1.2. Le digesteur Indien ou à « toit flottant »	22
5.1.3. Le digesteur à écoulement piston et les digesteurs préfabriqués	23
5.1.4. Digesteur en voie solide ou « batch »	27
5.1.5. Synthèse : comparaison des techniques	28
5.2. Concept de l'installation de biogaz	31
5.2.1. Broyage des intrants	31
5.2.2. Digesteur	33
5.2.3. Ligne de biogaz	35
5.2.4. Stockage du biogaz	37
5.3. Bilan-matière	39
5.4. Dimensionnement et conditions opératoires	44
6. Valorisation du biogaz	48
6.1. Transport	48
6.2. Valorisation	48
6.3. Bilan-énergie	50
7. Valorisation du digestat	51
8. Analyse économique	53



8.1.	Investissements.....	53
8.2.	Financement de l'installation de méthanisation.....	54
8.3.	Frais d'exploitation.....	54
8.4.	Recettes	55
9.	Bénéfices	56
	Conclusions.....	57



BIBLIOGRAPHIE

- [1] État des lieux sur la gestion des déchets solides ménagers dans la commune de Sô-Ava
- [2] CLEDJO P., Climat, pression anthropique, impacts environnementaux et dynamique des ressources biologiques du Lac Nokoué
- [3] DAÏNOU K., Consommation de bois dans les zones humides du complexe ouest du Bénin : besoin et gestion locales des formations ligneuses
- [4] FACT Foundation, Manual for the construction and operation of small and medium size biogas system
- [5] MARIA JANDL O., Barriers for the employment of floating invasive weeds for biogas production in local communities in West African Developing Countries
- [6] EDELMANN W., ENGELI H., The arbi Plug-Flow digester in Tanzania – A medium-size biogas plant for developing countries
- [7] PRADELLE A., Étude de faisabilité d'un projet de compostage de la jacinthe d'eau dans la communauté de Sô-Ava au Bénin
- [8] Schéma Directeur d'Aménagement de la Commune (SDAC) Sô-Ava
- [9] CHARLES G., Anaerobic Digestion – Principles and practices for Biogas Systems
- [10] CHENG S., Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries
- [11] ALMOUSTAPHA O., Production de biogaz et de compost à partir de la jacinthe d'eau pour le développement durable en Afrique sahélienne
- [12] ALMOUSTAPHA O., Biogas production using water hyacinthes to meet collective energy needs in a sahelian country
- [13] <http://www.feedipedia.org/node/160>
- [14] AKINWANDE W. O., Biomass yield, chemical composition and the feed potential of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*, Mart.Solms-Laubach) in Nigeria
- [15] VAIDYANATHAN S., Biogas production in batch and semicontinuous digesters using water hyacinth
- [16] KLASS D. L., Methane production by anaerobic digestion of water hyacinth (*eichhornia crassipes*)
- [17] MOORHEAD K. K., Batch anaerobic digestion of water hyacinth : effects of particle size, plant nitrogen content, and inoculum volume





INTRODUCTION

Les besoins urgents identifiés sur le territoire de la commune de Sô-Ava, au Bénin, sont :

- La demande en énergie domestique avec comme corollaire la réduction de la déforestation, l'atténuation des changements climatiques et l'amélioration des conditions de vie des femmes et des enfants;
- La lutte contre la prolifération de la jacinthe d'eau avec comme corollaire le développement des activités socio-économiques (protection de la biodiversité halieutique, pêche, tourisme, écoulement des produits agricoles, etc.);
- La gestion durable des déchets solides ménagers avec comme corollaire l'assainissement du cadre de vie et l'amélioration de la santé des populations.

Le projet vise à valoriser énergétiquement ces jacinthes d'eau et les biodéchets des ménages sous forme de biogaz, et d'utiliser cette source énergétique renouvelable en substitution du bois de feu utilisé par les populations.

Afin d'atteindre les objectifs susmentionnés, le projet est divisé en deux phases : l'étude de faisabilité et la mise en œuvre d'une installation pilote.

Ce rapport intermédiaire constitue l'étude de faisabilité. Il évalue les différentes techniques de digestion existantes adaptées aux intrants considérés et aux conditions béninoises et analyse les solutions techniques permettant de transporter le biogaz vers les consommateurs.

Cette étude de faisabilité a été alimentée par des visites de terrain (avril et septembre 2015), des recherches bibliographiques (entre autres confiées à P. Auvay et M. Menoud, étudiants à l'EPFL, dans le cadre d'un Design project) et des échanges avec des experts expérimentés dans la mise en œuvre de systèmes de digestion en pays tropicaux (W. Edelmann / AR-BI ; O. Dumont / Nouvelle Planète).





1. CARACTÉRISATION DU TERRITOIRE

1.1. Le lac Nokoué

D'une superficie de 339 ha, le lac Nokoué est le plus important lac au Bénin. Il est situé au Sud-Est du pays. S'étendant sur les départements de l'Ouémé, de l'Atlantique et du Littoral, il est limité à l'ouest par le plateau d'Abomey-Calavi, à l'est par la lagune de Porto-Novo, au nord par la plaine d'inondation du fleuve Ouémé et de la rivière Sô puis au sud par la ville de Cotonou. Le chenal de Cotonou et le canal de Totchè relie respectivement le lac à l'Océan Atlantique et à la lagune de Porto-Novo.



Figure 1 : Lac Nokoué [source : ramsar.org]

On y rencontre divers types de formations marécageuses dominées par des espèces comme *Paspalum vaginatum*, *Cyrtosperma senegalensis* et *Cyperus articulatus*, *Typha australis* et *Cyperus striatus*.

Au cours d'une année, le lac Nokoué connaît des périodes de crue et d'étiage.

La crue correspond au moment où le niveau de l'eau augmente considérablement au point d'inonder les plaines. Elle intervient souvent à partir du mois de juillet jusqu'à octobre. Cette augmentation du niveau de l'eau du lac est liée au débordement du fleuve Ouémé et de la rivière Sô au début de la saison des pluies et suivant la pluviométrie. Mais, cette période de crue peut également varier substantiellement dans le temps suivant les modifications observées dans la pluviométrie de l'année concernée.

À la fin de la saison pluvieuse, l'évapotranspiration entraîne la diminution du niveau de l'eau suivant le niveau d'ensoleillement observé. Cette baisse du niveau de l'eau (saison d'étiage) permet une forte colonisation de l'eau du lac par celle de l'Océan Atlantique. En conséquence, l'eau du lac Nokoué devient salée au.

Toutefois, faut-il mentionner que cette salinité n'est observée que dans les zones proches de l'Océan Atlantique. En continuant vers le nord, la salinité de l'eau diminue jusqu'à l'extrême nord du lac Nokoué où l'eau est toujours douce.



La biodiversité halieutique du lac Nokoué est essentiellement composée :

- d'espèces de poissons (*Ethmalosa fimbriata*, *Sarotherodon melanotheron*, *Eucinostomus melanopterus*, *Elops lacerta*, *Citharichthys stampflii*, *Hemichromis fasciatus*, *Tilapia guineensis* etc.)
- d'espèces de mollusques (*Corbula trigona*, *Anadala senilis*, *Crassostrea gasar*, *Tempanotonus* sp et *Pachymelania* sp.)
- d'espèces de crustacés (*Goniopsys cruentata*, *Cardiosoma amatum* et *clibernhardius africanus*) et de végétations (*Paspalum vaginatum* Sw., *Cyperus articulatus* L., *Phragmites australis* W.D. Clay., *Eichhornia crassipes* Mart., *Crotalaria retusa* L.).

La faune sauvage n'est pas très abondante. Elle est réduite à quelques échantillons de mammifères et de singes. On y trouve également beaucoup d'oiseaux et des reptiles.

1.2. Sô-Ava

La commune de Sô-Ava est composée de 7 arrondissements pour un total de 42 villages et quartiers de ville sur une superficie d'environ 218 km². Elle se situe à environ 30 kilomètres de la capitale économique du Bénin (Cotonou).



Figure 2 : Commune de Sô-Ava [1]



Le tableau suivant présente la population par arrondissement :

Arrondissements	Effectifs en 2012	Nombre de ménages
Ahomey-Lokpo	13 249	2 548
Dékanmey	6 417	1 234
Ganvié 1	15 552	2 991
Ganvié 2	15 566	2 993
Houédo-Aguékou	16 053	3 087
Vèckky	33 550	6 452
Sô-Ava	15 069	2 898

Tableau 1 : Population de Sô-Ava par arrondissement

Les zones d'habitations les plus densément peuplées sont les arrondissements constitués de villages lacustres ou en zones inondables.

Les habitats sont toujours groupés. Les maisons sont des habitations traditionnelles sur pilotis qui sont généralement en "ébène rouge", bois qui résiste plus à la dégradation par l'eau. Les toits sont encore dans leur grande majorité en chaumes ou en herbes des marécages (*Paspalum vaginatum*) qui les rendent plus fraîches et plus résistantes. Cependant, la tôle ondulée semble par endroits se généraliser, malgré sa vulnérabilité à la rouille.

Le déplacement à l'intérieur de la commune se fait surtout en pirogues motorisées et non motorisées. Quelques 77 km de voies terrestres permettent la circulation à l'intérieur et à l'extérieur de la commune. Malheureusement, ces voies sont peu praticables, en particulier la voie principale Akassato –Sô Ava qui s'inonde chaque année. Ce faisant, le lieu de l'embarcadère varie suivant les périodes de crue et d'étiage.

Les activités socio-économiques menées dans la commune sont entre autres la pêche, l'agriculture, le tourisme, etc.

Dans le domaine agricole, il existe des plaines inondables favorables à l'agriculture et des organisations de producteurs enregistrées officiellement. Les principales cultures sont : le maïs, les légumes feuilles, l'arachide, la tomate, le gombo, le manioc, le niébé, la patate douce et le piment. Parfois, l'enclavement de la commune rend difficile l'approvisionnement en intrants et l'écoulement des produits agricoles.

Dans le domaine de la pêche, les plans d'eau constituent la principale ressource naturelle de la commune et les populations disposent pour leur exploitation des techniques et des équipements variés. Des groupes professionnels de pêcheurs fonctionnels existent dans la commune où les crues périodiques améliorent les rendements des trous à poissons et des acadja (pièges à poissons). Cependant, l'activité de pêche reste confrontée à la baisse de la productivité à cause de l'encombrement du lac par les acadja, l'utilisation des engins de pêches prohibés, etc.



2. DÉFINITION D'UNE INSTALLATION DE BIOGAZ

La « digestion anaérobie » ou « méthanisation » est un processus biologique naturel. Il s'agit d'une dégradation et d'une stabilisation de la matière organique par des micro-organismes, sous une atmosphère exempte d'oxygène.

Une installation de biogaz crée les conditions permettant le développement spontané des micro-organismes responsable de ce phénomène, le maîtrise et le contrôle.

L'enceinte où se déroule la digestion anaérobie est qualifiée de « digesteur ».

Lors du phénomène de digestion anaérobie, cette matière organique est convertie par les micro-organismes en un mélange de gaz appelé « biogaz ». Une partie de la matière organique, difficilement dégradable, n'est cependant pas convertie en biogaz et est évacuée du digesteur sous forme liquide ou solide, appelé « digestat ».

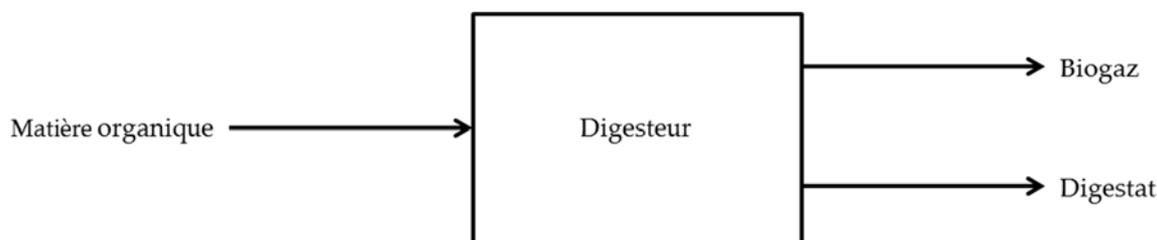


Figure 3 : Principe de la méthanisation

La matière organique qui alimente le digesteur peut provenir de sources diverses : activités humaines (domestiques, agricoles, agro-industrielles, etc.) ou milieu naturel.

Dans notre cas, il s'agit de jacinthes d'eau douce (milieu naturel) et de biodéchets des ménages (activités domestiques).

Le biogaz est composé en majorité de méthane (CH_4), gaz combustible et source d'énergie. Dans le contexte de l'étude, le biogaz est destiné à être consommé par les ménages pour les usages domestiques.

Le digestat, résidu de la digestion, se présente sous forme liquide ou solide.

Il contient la matière organique difficilement dégradable mais facilement humifiable ainsi que la totalité des éléments fertilisants contenus dans la matière organique entrante (phosphore P, azote N, potassium K).

Par sa composition, le digestat peut donc être utilisé comme amendement, et comme fertilisant. Il est donc destiné à un retour au sol.



3. CARACTÉRISATION DES FLUX / PARAMÈTRES DE TERRAIN / MODE DE COLLECTE

3.1. Jacinthes d'eau

La jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) est une plante aquatique flottante originaire d'Amérique du Sud. Elle aurait été introduite sur le continent africain comme plante ornementale.



Elle est considérée comme une plante envahissante lorsque plusieurs facteurs sont réunis, dont la disponibilité en nutriments, la faible salinité de l'eau et une température comprise entre 25 et 30°C. Sa vitesse de prolifération élevée fait d'elle une des plantes qui prolifère le plus vite au monde.

Sur le lac Nokoué, dès le début de la saison des pluies lorsque la salinité de l'eau diminue, la jacinthe d'eau apparaît, charriée par les fleuves tributaires du lac en eau douce telle que l'indique la figure ci-dessous :



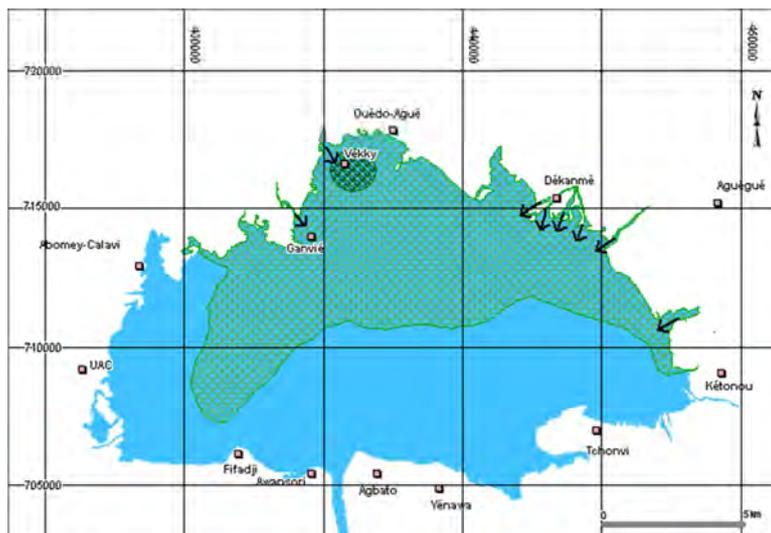


Figure 4 : Surfaces couvertes par les amas de jacinthes d'eau sur le lac Nokoué [2]

Elle prolifère et s'accumule alors au nord du lac.

Lors de la saison sèche, lorsque que le débit d'eau douce des fleuves tributaires diminue et que l'eau salée remonte par le chenal de Cotonou et augmente la salinité de l'eau, la prolifération de la jacinthe est donc inhibée et elle se décompose dans l'eau.

Jusqu'à la fin de la saison sèche, la jacinthe d'eau disparaît donc de la surface du lac pendant une durée pouvant atteindre 2 à 3 mois, exceptés dans les villages les plus au nord de la commune, où la salinité ne semble pas augmenter. La jacinthe y persiste en effet toute l'année.

L'ensemble des activités est confrontée à la prolifération de la jacinthe d'eau, identifiée comme principale contrainte lors des concertations avec les groupes d'acteurs socio-professionnels. Elle rend difficile la pêche et asphyxie les poissons. De plus, la jacinthe d'eau rend difficile le transport lacustre et ralentit les activités socio-économiques menées par les communautés locales.

S'il n'est pas possible d'estimer la quantité totale de jacinthes d'eau disponibles, les visites sur le terrain ont montré qu'il y a beaucoup plus de jacinthes que nécessaire à disposition.

3.2. Biodéchets des ménages

Il n'y a actuellement aucune gestion des déchets sur la commune de Sô-Ava, quelle que soit leur nature.

Les habitants se débarrassent de leurs déchets dans des dépôts sauvages, situés le plus souvent aux abords de l'eau ou directement dans l'eau pour les villages lacustres. Le lac est donc le destinataire final de l'ensemble des déchets.

Un rapport de la mairie de Sô-Ava sur l'état des lieux de la gestion des déchets solides ménagers dans la commune de Sô-Ava [1] estime la quantité de déchets produite par personne à 0,34 kg par jour.

Une caractérisation effectuée auprès de 100 ménages a permis de déterminer les composantes des déchets solides ménagers. Le résultat est présenté ci-dessous :



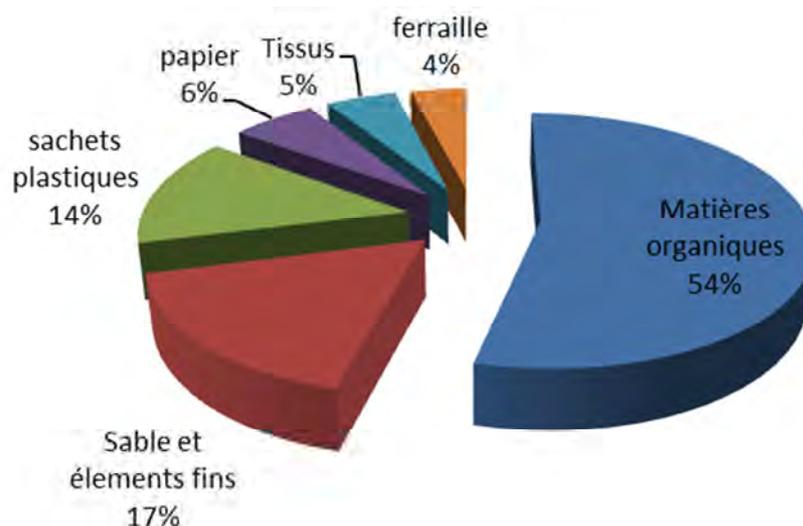


Figure 5 : Caractérisation des déchets solides ménagers dans la commune de Sô-Ava [2]

Cette caractérisation permet d'évaluer la quantité de biodéchets produite par habitant à **0,18 kg/j**.

Compte tenu de la population de la commune, la quantité de biodéchets produite par arrondissement est donnée dans le tableau suivant :

Arrondissements	Effectifs en 2012	Nombre de ménages	Production journalière [kg]	Production annuelle [t]
Ahomey-Lokpo	13 249	2 548	2 385	870
Dékanmey	6 417	1 234	1 155	422
Ganvié 1	15 552	2 991	2 799	1 022
Ganvié 2	15 566	2 993	2 802	1 023
Houédo-Aguékou	16 053	3 087	2 890	1 055
Vèckky	33 550	6 452	6 039	2 204
Sô-Ava	15 069	2 898	2 712	990

Tableau 2 : Production de biodéchets par arrondissement et par jour/an

La quantité de biodéchets est conséquente et potentiellement intéressante. Cependant, comme détaillé plus haut, le service de collecte et de traitement des déchets n'est actuellement pas proposé aux habitants et ceux-ci ne sont pas familiers avec le tri des déchets organiques. La transmission et l'acceptation de cette habitude nécessitera sans doute du temps. Il est donc envisagé dans un premier temps de ne pas considérer ce gisement dans l'estimation de la production de biogaz, tout en y tenant compte dans le dimensionnement des installations.



3.3. Demande en biogaz

Le biogaz est un mélange de gaz dont les proportions varient en fonction de son origine. On y retrouve les gaz suivants dans les proportions suivantes :

Composés		Concentration
Méthane	CH ₄	50-70 % _{vol.}
Dioxyde de carbone	CO ₂	30-50 % _{vol.}
Diazote	N ₂	< 1 % _{vol.}
Dioxygène	O ₂	< 0.2 % _{vol.}
Dihydrogène	H ₂	< 1 % _{vol.}
Hydrogène sulfuré	H ₂ S	< 30 mg/Nm ³
Ammoniac	NH ₃	< 10 mg/Nm ³
Humidité	H ₂ O	saturation

Tableau 3 : Composition du biogaz brut

Le méthane est le composant principal du biogaz. C'est un gaz incolore et sans odeur. La présence de méthane, hydrocarbure gazeux dont le pouvoir calorifique s'élève à 9,94 kWh_{PCI}/m³ confère au biogaz son intérêt énergétique.

La présence du dioxyde de carbone, second composant au pouvoir calorifique nul, réduit donc le pouvoir calorifique du biogaz.

Parmi les gaz traces, dont la teneur dans le biogaz est inférieure à 1%_{vol.}, ceux dont la présence est à surveiller sont la vapeur d'eau et l'hydrogène sulfuré.

On distingue deux types de nuisances, celles qui concernent les installations techniques de celles qui concernent la santé humaine.

L'hydrogène sulfuré et ses produits dérivés sont très corrosifs. En présence d'humidité dans laquelle ils se dissolvent, ils forment des solutions acides responsables de la corrosion des parties métalliques des installations de biogaz (vannes, brûleurs, tuyauterie, etc.). L'hydrogène sulfuré et l'eau sont donc à éliminer du biogaz avant la valorisation de celui-ci.

De plus, l'hydrogène sulfuré est un gaz toxique pour l'homme à partir de concentrations de 14 mg/Nm³ et létal dès 1'400 mg/Nm³.

Concernant la vapeur d'eau, le principal problème lié à sa présence est l'obstruction des conduites de gaz lorsque l'eau condense dans celles-ci.

Le biogaz est une source d'énergie qui, selon les besoins, peut être considéré comme un combustible ou un carburant. Il peut substituer entre autres le gaz naturel, le bois ou les carburants dérivés du pétrole. À partir du biogaz, il est donc possible de produire de la chaleur, de l'électricité et de l'énergie mécanique.

Compte tenu du faible niveau d'électrification du territoire de l'étude, il n'est pas envisagé de considérer le biogaz pour la production d'électricité.

D'autre part, il existe plusieurs consommateurs d'énergie non électrique.

Les ménages, en raison de leur grand nombre, sont les plus grands consommateurs d'énergie et ce, pour la préparation des repas. Traditionnellement, ils consomment du



bois de chauffe ou du charbon pour les ménages les plus aisés. La consommation de gaz comprimé en bouteille a été mentionnée, mais pas sur le territoire de l'étude.



Illustration 1 : Foyer et bûches pour la cuisson des repas

Si le bois de chauffe est moins cher que le charbon, ce dernier est cependant préféré car il ne noircit pas les casseroles. Face à ce constat, le biogaz sera sans doute bien accepté au sein des ménages car sa combustion ne dégage pas de fumées.

Le bois est vendu en fagots, de tailles et de coûts variables. Son approvisionnement, par barque, est difficile en période de crue, qui marque le début de la prolifération des jacinthes.



Illustration 2 : Approvisionnement en fagots de bois

D'autres consommateurs d'énergie ont été identifiés.

L'activité de transformations de crevettes est consommatrice de bois de chauffe. Elle consiste à sécher et fumer les crevettes. La substitution de ce bois par le biogaz semble non faisable car la combustion du biogaz n'engendre pas de production de fumée. Cela représente cependant un avantage pour les ménages, car une cuisine sans fumée est plus agréable.





Illustration 3 : Fumage de crevettes

Enfin, on peut constater une très grande consommation de carburant, pour les moteurs des barques et de façon plus marginale pour le pompage de l'eau potable. Une substitution de ce vecteur engendrerait cependant des changements de moteurs non envisageables économiquement pour l'ensemble de la population.

La consommation de bois des populations vivant sur le territoire de l'étude est difficile à estimer. Les quelques mesures de consommation effectuées sur le terrain n'ont pas donné de résultats reproductibles.

Une étude réalisée sur un territoire comparable [3] montre que la consommation individuelle de bois à des fins énergétiques dépend de plusieurs facteurs :

- La taille du ménage : la consommation individuelle décroît lorsque la taille du ménage augmente
- Le type de village : autour de fleuves et des lacs ou sur terre ferme
- Les habitudes particulières, comme celles consistant à laisser le foyer allumé toute la journée afin de pouvoir bénéficier du feu à tout moment
- Le type de foyer : traditionnel ou amélioré

Néanmoins, des tendances de consommation ont pu être dégagées. Ainsi, pour des villages similaires à ceux de la commune de Sô-Ava, la consommation de bois à des fins énergétiques varie de 0,77 à 1 kg/pers./j., soit 0,885 kg/pers./j, de moyenne.

Le contenu énergétique du bois dépend de l'essence brûlée ainsi que de son humidité et de l'efficacité du foyer dans lequel il est brûlé. Par manque de données de terrain, nous nous baserons sur un équivalent énergétique de 210 L_{biogaz}/kg_{bois} [4], soit une demande en biogaz de 186 L_{biogaz}/pers./j.

Ce résultat est supérieur à l'estimation que Maria Jandl [5] fait, qui est de 100 L_{biogaz}/pers./j. Cette estimation est basée sur une consommation d'énergie journalière nécessaire pour porter 1L d'eau à ébullition.

Pour le dimensionnement de l'unité de méthanisation de Mivumomi, Edelmann [6] prend également comme base une production de 50-55 m³_{biogaz}/j. pour subvenir aux besoins de 500 personnes, soit 100 à 110 L_{biogaz}/pers./j.



Le besoin en biogaz est donc estimé à 100-186 L_{biogaz}/pers./j.

3.4. Digestat

Le digestat contient la matière organique résiduelle non convertie en biogaz lors du processus de digestion. Comme indiqué dans le § 2, il est destiné à être valorisé en agriculture.

De façon générale, on considère comme surfaces potentiellement épandables, les surfaces maraichères destinées à l'alimentation humaine, les surfaces de pâturage destinées à l'alimentation animale et les surfaces de cultures céréalières destinées à la fois à l'alimentation humaine et à l'alimentation animale.

Sur la commune de Sô-Ava, les rives du lac sont majoritairement marécageuses (Mama, 2010) et sont inondées lors de la crue de la rivière Sô qui dure d'Août à Octobre. Les surfaces agricoles qui s'y trouvent sont néanmoins exploitées, seulement en période d'étiage.

Certaines surfaces sont cependant non inondables et donc exploitées toute l'année.

L'activité d'élevage est assez limitée et en mode divagation. Les surfaces de pâturage ne sont donc pas clairement délimitées.

L'activité de maraichage est plus structurée et semble être la seule activité potentiellement consommatrice de digestat sur le territoire de l'étude.

Le digestat se présente sous forme liquide et est transportable dans des contenants fermés, type fûts :



Illustration 4 : Exemple de contenant pour le transport du digestat

Dans la mesure où le processus de digestion s'effectue dans des enceintes hermétiques, il n'entraîne pas de diminution significative de volume. Le volume de digestat produit correspond donc au volume de jacinthes d'eau et de biodéchets alimentant le digesteur.



4. SITE(S) D'IMPLANTATION DE L'INSTALLATION DE BIOGAZ

Pour déterminer les sites d'implantation des installations de biogaz les plus judicieux, il est nécessaire de localiser :

- les lieux de production des intrants (jacinthes d'eau, biodéchets des ménages)
- les lieux de valorisation du biogaz
- les lieux de valorisation du digestat

et de définir les modes et les contraintes de transport de chaque produit.

	Jacinthes d'eau	Biodéchets	Biogaz	Digestat
Lieu de production ou d'utilisation	Lac	Villages	Villages	Parcelles agricoles
Consistance	Solide	Solide	Gaz	Liquide
Volume	+++	+	++	+++
Mode de transport	Bassines de 40kg portées sur la tête	Contenants à porter sur la tête ou charrettes tirées manuellement	Sacs à gaz portés sur le dos	Fûts hermétiques
Pénibilité du transport	++	+	+	+++

Tableau 4 : Définition de la pénibilité du transport des différents produits

Les matières dont les contraintes de transport sont les plus élevées sont la jacinthe d'eau et le digestat. L'implantation des unités de méthanisation doit être choisie de sorte à minimiser les transports de jacinthe d'eau et de digestat.

La jacinthe d'eau colonisant la surface entière du lac, quel que soit l'emplacement des unités de méthanisation, la distance à parcourir pour collecter de la jacinthe d'eau est jugée non limitante. L'implantation des unités de méthanisation doit donc être associée au lieu de valorisation du digestat, donc des parcelles des maraichers.

Afin d'éviter les risques d'inondation des installations et de permettre la valorisation du digestat même en période de crue, **l'implantation des unités de méthanisation est restreinte aux parcelles maraichères non inondables.**

Les maraichers se sont constitués en groupements, enregistrés officiellement au Secteur Communal du Développement Agricole (SCDA), ce qui leur permet, entre autres, de faire des demandes de micro-crédits. Sur le territoire d'étude, on compte 25 groupements enregistrés (il existe des groupements informels mais aucune statistique les concernant n'est disponible) pour un effectif de chefs d'exploitation de 386. L'effectif moyen par groupement est donc **d'environ 15 membres par groupement.**



Certains de ces groupements ont déjà été formés au compostage de la jacinthe d'eau par ACED [7]. Une visite et des entretiens auprès des membres d'un de ces groupements ont confirmé leur très grande motivation et leur fort engouement à la pratique du compostage et à l'implantation d'unités de méthanisation telles qu'elles leur ont été présentées.



Illustration 5 : Tas de compostage de jacinthes d'eau

L'alimentation des digesteurs viendrait s'intégrer à l'activité des maraichers, sans toutefois la perturber. Cette nouvelle tâche occuperait 2 personnes, pour 2 allers-retours vers la rive.

Les digesteurs seraient donc alimentés par **160 kg/j. de jacinthes d'eau**.

Le dimensionnement des unités de méthanisation devra répondre aux besoins d'une population donnée, que ce soit besoins énergétiques que besoins en fertilisants et amendement.

Cette population cible est constituée des membres des groupements de maraichers ainsi que de leur famille. À Sô-Ava, la population est estimée à 115'456 habitants [1]. La taille des ménages est d'environ 5 pers./ménage [8].

Si l'on estime que chaque membre d'un groupement de maraichers se rattache à un ménage, **la population cible est donc constituée de 15 ménages, soit 75 personnes**.

Compte tenu de la production de biodéchets des habitants de Sô-Ava, annoncée au § 3.2, l'apport de biodéchets serait donc de **13,5 kg/j. de biodéchets**.

Le schéma suivant représente les flux entrants et leur provenance ainsi que les flux sortants et leur provenance.



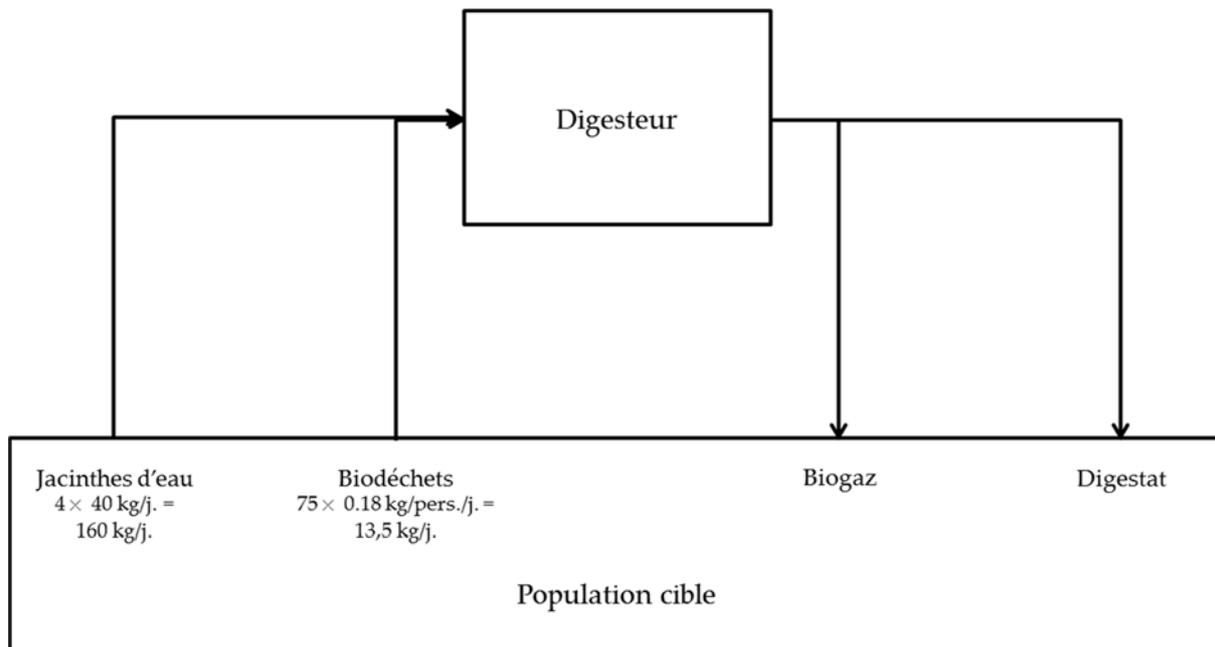


Figure 6 : Flux entrants et sortants d'une installation de biogaz

5. DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION DE BIOGAZ

OBJECTIFS :

- Déterminer quelle structure et avec quels matériaux le digesteur devra être construit pour s'adapter au terrain, à la composition des intrants avec lesquels il est alimenté, aux ressources et à la main d'œuvre disponible. De plus, le système de maintenance devra être simple et ne requérir que peu ou pas d'expertise. Enfin, la production de biogaz présentant des risques d'inflammabilité, voire d'explosion, le design devra ainsi répondre aux exigences de sécurité.
- Calculer le dimensionnement pour répondre aux besoins d'une population cible, au sein de la commune de Sô-Ava.
- Élaborer un mode opératoire complet, de l'alimentation du digesteur au mode d'approvisionnement des familles, assurant une production constante et suffisante afin de faciliter et favoriser le remplacement du bois pour la préparation des repas.

5.1. Choix du type de digesteur

De nombreuses expérimentations et projets de taille réelle ont été développés pour produire du biogaz à partir de la jacinthe d'eau, utilisant des systèmes variés. Les techniques de production adaptées aux pays en voie de développement, et les mesures de rendement sont autant d'informations qui orienteront le choix du digesteur le plus approprié pour ce projet, ainsi que certains paramètres utilisés pour son dimensionnement

5.1.1. Le digesteur Chinois ou « à dôme fixe »

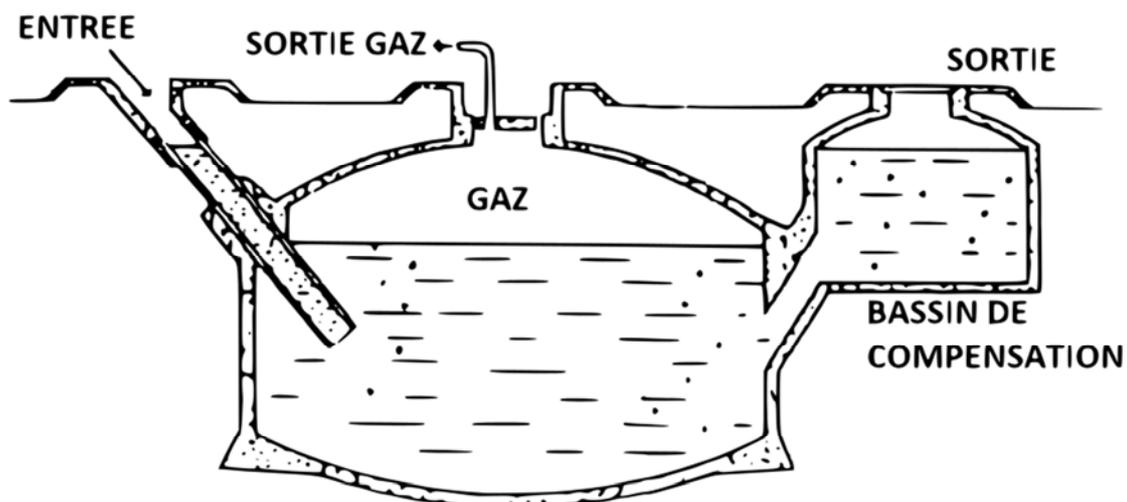


Figure 7 : Schéma d'un digesteur chinois ou à « dôme fixe » [9]

Dès le début des années 50 en Chine, des aménagements se développent dans les campagnes et donnent des résultats plus que satisfaisants. Ceci a conduit au design d'un digesteur efficace et adaptable. Compte tenu du nombre important et de la grande variété de pays dans lesquels ce système est présent, et de la longue période d'expérimentation,

la documentation est exhaustive et les détails relatifs à l'installation d'un digesteur chinois sont faciles à obtenir et fiables.

Le réacteur comprend un compartiment de digestion, sous le niveau du sol, alimenté à mi-hauteur par une canalisation. L'orifice d'extraction est situé à la même hauteur du côté opposé (cf. figure). L'opération est continue ; ainsi, à chaque nouvelle alimentation, pour un volume d'intrants ajouté, le même volume de digestat doit être extrait. Un système de brassage est cependant nécessaire pour maintenir une cinétique de réaction suffisamment élevée. Les intrants d'un digesteur à dôme fixe doivent être liquides, c'est-à-dire d'une teneur en eau supérieure à 90%. Le temps de résidence hydraulique est d'environ 50 jours.

Le biogaz produit est stocké dans la partie supérieure du dôme et est soutiré par le regard intégré au sommet de celui-ci. La production de biogaz au sein des matières en cours de digestion assure un certain brassage.

Un second compartiment compose le digesteur : le bassin de compensation, connecté au réservoir principal et contenant du digestat. Plus petit et moins profond, il permet de mettre le système sous pression lors de la production du biogaz et garantit une certaine sécurité quant aux surpressions. Si le biogaz n'est pas consommé à mesure qu'il est produit, le bassin de compensation déborde pour compenser l'augmentation de la pression de gaz dans le réservoir principal.

Ce digesteur chinois peut être construit de différentes manières, avec des matériaux variables tels que des pierres, briques et différents types de béton. Cela dépend des ressources disponibles sur place. Le travail sur le couvercle constitue une part délicate de la construction et doit être réalisé avec minutie, spécialement le plâtrage et l'enduit car l'étanchéité en dépend. Les forces importantes induites par la pression élevée maintenue dans le digesteur sont minimisées par la forme en dôme. Mais une certaine résistance de la structure doit malgré tout être garantie.

5.1.2. Le digesteur Indien ou à « toit flottant »

En Inde, l'utilisation du biogaz a commencé par une période d'expérimentation entre 1937 et 1950 [9]. C'est à cette époque (1956), que Jashu Bhai J. Patel a conçu pour la première fois une installation pourvu d'un réservoir de gaz flottant. Le développement de projets a continué jusqu'aux années 1960 et depuis, de nombreuses installations fonctionnelles ont été construites. Le modèle de Patel a été amélioré avec le temps. Ce type de digesteur convient pour des intrants liquides (90% d'eau) et homogènes, comme des déjections animales ou des déchets verts (de préférence prédécoupées), qui n'ont pas tendance à former des couches. Le temps de séjour est compris entre 30 et 50 jours, en fonction de la température [9]. Ce digesteur est également exploité de façon continue.



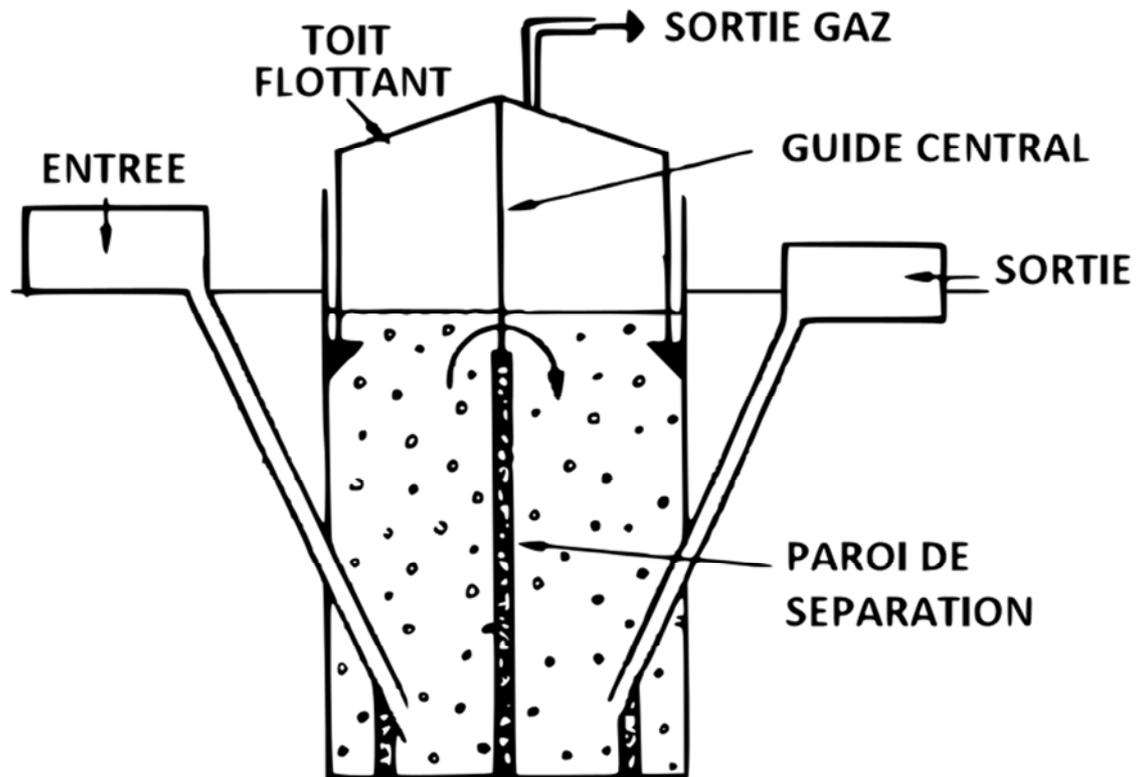


Figure 8 : Schéma d'un digesteur indien ou à « toit flottant » [9]

Le digesteur Indien est composé d'un digesteur principal cylindrique, d'un gazomètre, d'une fosse d'alimentation et d'une fosse d'extraction du digestat. Il est généralement construit à partir de briques et de ciment, bien que du béton armé puisse parfois être utilisé. Le cylindre flottant est composé de plaques de métal (e.g. acier). D'autres matériaux peuvent être utilisés comme du polyéthylène ou de la fibre de verre, pour éviter les problèmes de corrosion. Le toit se déplace verticalement en fonction des quantités de biogaz stockées et prélevés ; la pression dans le digesteur peut être facilement ajustée en disposant des poids dessus.

5.1.3. Le digesteur à écoulement piston et les digesteurs préfabriqués

Le digesteur piston est composé d'un long réservoir alimenté par une canalisation et pourvu d'une canalisation d'extraction. Pour un rapport de 1/5 entre son diamètre et sa longueur, le temps de résidence hydraulique des matières y est d'environ 40 jours. Une valve de sûreté peut être installée par sécurité. La forme allongée permet un brassage du contenu dans système additionnel. Il est alimenté par des intrants liquides dont la granulométrie est suffisamment fine.

Ces digesteurs sont construits sur place, avec des matériaux disponibles localement, tels que des briques ou du béton. La partie supérieure peut être constituée par un dôme en béton ou en fer galvanisé ou par une membrane souple ancrée au sol permettant de stocker le biogaz. Malgré l'avantage de la stabilité et de la durabilité, ces installations sont souvent confrontées à des problèmes d'étanchéité au niveau du couvercle [10].



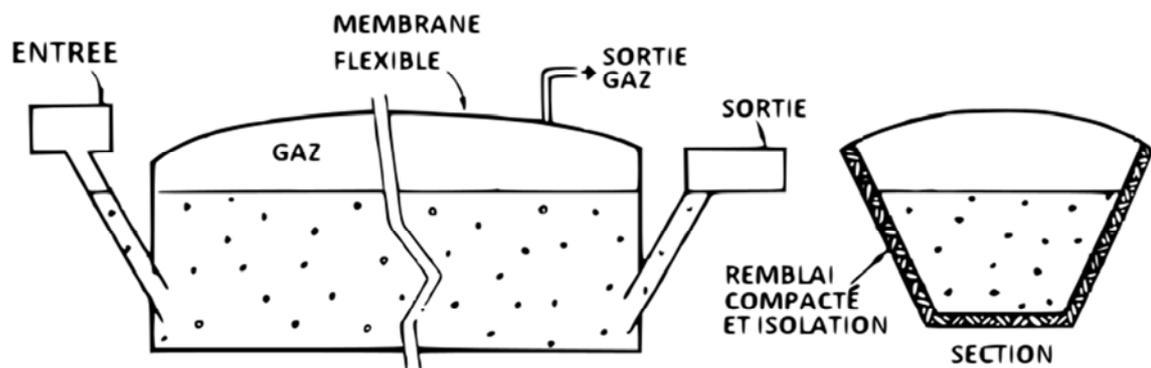


Figure 9 : Schéma d'un digesteur fonctionnant en mode piston [9]



Illustration 6 : Digesteur fabriqué sur place et recouvert d'une membrane [6]

Les digesteurs fabriqués sur place peuvent être enterrés ou semi-enterrés suivant leur profondeur.

Il est possible de les munir d'un brasseur horizontal, actionné à la main par une manivelle pour les petits volumes de digesteur, ou par un système de transmission pour les plus gros volumes.

Sur le même principe, on trouve les digesteurs préfabriqués.

Ces digesteurs ont été développés en premier lieu à Taïwan en 1960. Hors-sol, ils sont plus simples et plus rapides à mettre en place que n'importe quelle construction, car nécessitent seulement d'être posés sur le sol. Le digesteur est généralement léger et peut aussi être disposé dans une tranchée pour plus de stabilité.





Illustration 7 : Exemple de tranchée pour renforcer la stabilité d'un digesteur préfabriqué [4]

La main d'œuvre requise pour la construction est donc réduite, ainsi que les connaissances en matière de construction.

On distingue les digesteurs « sac » en matériaux flexibles, de ceux fabriqués en matériaux solides.

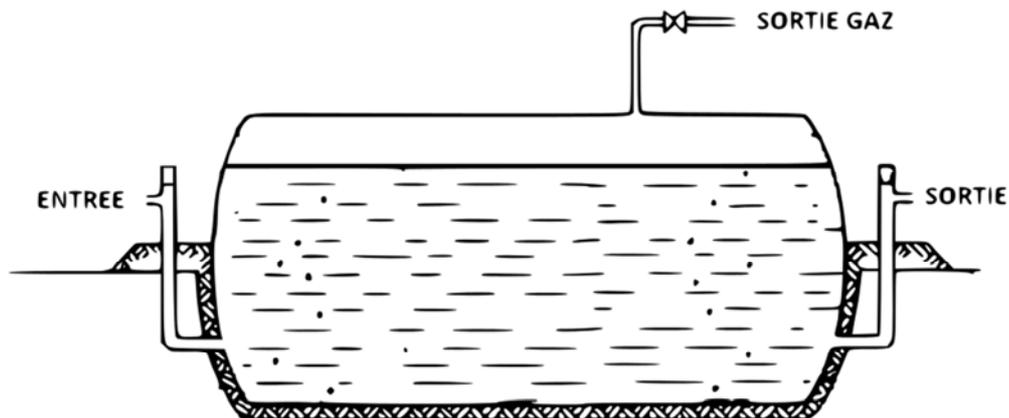


Figure 10 : Schéma d'un digesteur « bag » [9]

Le premier se trouve sous la forme d'un « sac » en plastique flexible dont la composition, la taille et l'épaisseur varient, toujours muni d'un tube d'alimentation et d'un tube d'extraction. Les essais avec le système « Flexi » montrent que, comme le digesteur est placé sur le sol, au fur et à mesure que le gaz est produit, il entraîne le gonflement du sac. Le volume de gaz produit est directement visible, ce qui facilite l'assimilation du processus par les utilisateurs. Un des inconvénients majeurs est son manque de durabilité dû à une moindre résistance du plastique et une confrontation avec les intempéries. On peut espérer une durée de vie d'environ 10 ans, compensée par des coûts d'investissement réduits.



Illustration 8 : Digesteur préfabriqué en matériau flexible

Les digesteurs préfabriqués solides présentent une durée de vie 2 fois plus longue que les digesteurs sac, similaire à celle d'une construction réalisée sur place. Ils ne sont pas nécessairement de forme cylindrique, mais sont adaptés à des installations domestiques de volume réduit sans système de brassage. Ils peuvent être conçus en PVC solide ou en matériaux composites tels que le digesteur « FRP » constitué d'un mélange de polyester insaturé, de résine, de plastique renforcé de verre, et de fibres de verre. Ce dernier a été développé en Chine dans les années 2000.



Illustration 9 : Digesteur préfabriqué en matériau solide



5.1.4. Digesteur en voie solide ou « batch »

Les digesteurs « batch » sont alimentés en mode discontinu. Le fonctionnement est le suivant : le digesteur est rempli avec les intrants, il est maintenu fermé pendant une durée déterminée. Le processus de digestion se déroule, le biogaz produit est extrait régulièrement ou s'accumule dans un stockage intermédiaire externe. À la fin du processus, le digesteur est ouvert, le digestat est évacué et valorisé. Le digesteur ainsi vidé, est de nouveau rempli pour un nouveau cycle de digestion.

C'est un système assez simple qui requiert une maintenance peu fréquente, mais un entretien important au moment du curage du digesteur.

La figure ci-dessous présente l'évolution de la production de biogaz lors d'un processus de digestion. Trois phases sont observables :

- Une période de latence pendant laquelle les conditions anaérobies nécessaires au développement des micro-organismes responsables de la dégradation de la matière organique se forment
- Le processus de digestion débute, le gaz produit contient peu de méthane et est donc peu combustible. La teneur en méthane augmente, la production également, jusqu'à atteindre un palier.
- La production de biogaz amorce une baisse régulière. La production de biogaz persiste, mais le débit n'est pas satisfaisant.

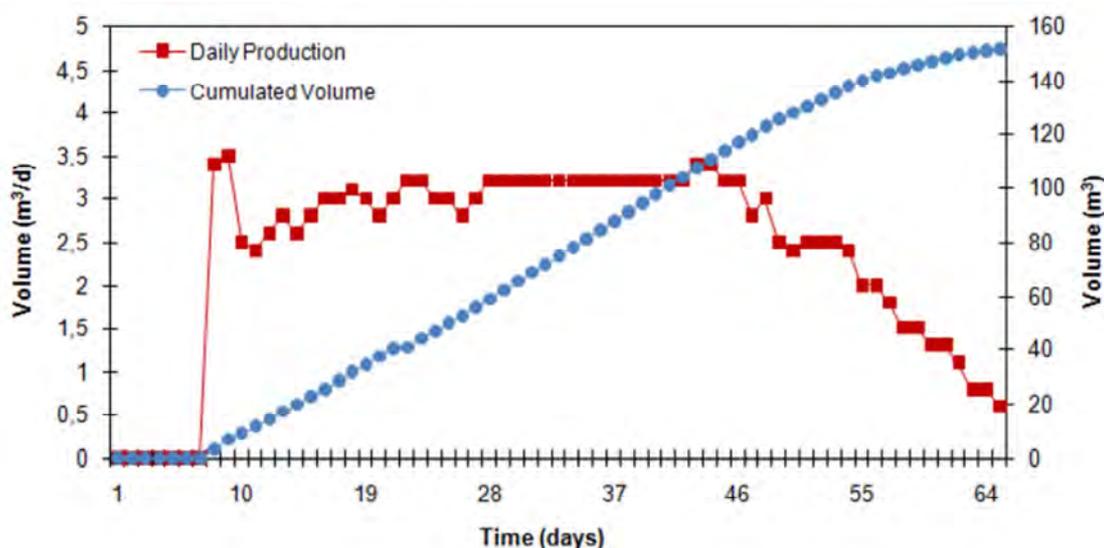


Figure 11 : Production de biogaz journalière et cumulée dans un digesteur à alimentation discontinue

Comme on observe sur le graphique précédent, la production de biogaz dans un tel système n'est pas constante. Afin de s'adapter à une demande en biogaz souvent continue, l'installation de méthanisation doit alors être munie de plusieurs digesteurs alimentés en décalage. La production cumulée de l'ensemble des digesteurs est alors constante.

L'avantage de ce type de digesteur est sa capacité à digérer des intrants solides, ce qui évite l'apport éventuel d'eau nécessaire aux types de digesteur décrits précédemment.



La construction de ces digesteurs est réalisée sur place, et sous le niveau du sol pour faciliter les opérations de chargement et de déchargement. Les matériaux utilisés sont similaires à ceux décrits précédemment.

Des essais avec ce type de digesteur alimenté avec des jacinthes d'eau ont été réalisés au Burkina Faso [11] et au Niger [12].



Illustration 10 : Digesteurs « batch »

5.1.5. Synthèse : comparaison des techniques

Le tableau ci-dessous compare les différents types de digesteurs précédemment décrits au regard de certains paramètres utiles pour le choix du digesteur. Cette comparaison permet d'appuyer la sélection du système le plus approprié au contexte du projet.



	Type de digesteur					
	Dôme fixe	Toit flottant	Piston			« Batch »
			Construit sur place	Préfabriqué		
				Solide	Flexible	
Disposition	enterré	enterré	semi-enterré	semi-enterré ou hors-sol	semi-enterré ou hors-sol	enterré ou hors-sol
Alimentation	continu	continu	continu	continu	continu	discontinu
Temps de résidence hydraulique ¹	50	30 – 50	40	15 – 20	15 – 20	50
Durée de vie [années]	10 – 20	10 – 15	10 – 20	> 25	< 10	variable
Durabilité	élevée (mais corrosion des parties métalliques)	élevée (mais corrosion des parties métalliques)	élevée	élevée	moyenne	variable
Observation visuelle du biogaz produit	oui grâce au bassin de rétention	oui	dépend du design	non	oui	dépend du design
Système d'agitation	oui	non	non / oui			non
Pertes thermiques	faibles	faibles	faibles	très faibles	moyennes	variables
Coût	élevé	élevé (surtout le toit métallique)	moyen	très bas	très bas	variable
Niveau de difficulté pour la construction	élevé	élevé / moyen	moyen	très bas	très bas	variable
Adaptabilité à une région avec un haut niveau d'eau souterraine	non	non	oui (pour autant que la nappe n'atteint pas la surface)	oui	oui	dépend du design
Main d'œuvre local (phase construction)	oui	oui	oui	non	non	dépend du design
Maintenance et entretien	faible	moyen mais fréquent (peinture du toit)	très peu et peu compliqué	très peu et peu compliqué	très peu et peu compliqué	difficile mais faible fréquence
Réparations	difficile car enterré	difficile pour les parties enterrées	difficiles (parties enterrées et si toit souple)	très difficile	difficile	dépend du design

Tableau 5 : Comparaison de différents types de digesteur disponibles

¹ Le temps de résidence hydraulique dépendant fortement des intrants valorisés, les valeurs sont données à titre indicatif et peuvent différer avec des jacinthes d'eau comme intrant



Seuls les deux premiers critères sont utiles pour choisir le type de digesteur le plus adapté au projet.

Comme indiqué au § 4, l'implantation des unités est limitée aux parcelles non-inondables des maraichers. Le caractère non inondable n'est pas suffisant pour permettre aux installations d'être enterrées. On peut supposer une déstabilisation du sol avec la montée du niveau des eaux souterraines durant les crues. Elles pourront cependant être partiellement enterrées pour garantir un certain ancrage, mais cela reste à évaluer en fonction du niveau atteint par les eaux souterraines en période de crues.

Cela restreint les types de digesteur adapté à la qualité du sol aux digesteurs piston et « batch ».

Pour le choix du mode d'alimentation du digesteur, les aspects suivants l'orientent vers une alimentation continue :

- Une opération quotidienne, plus adaptée à la demande en énergie
- Une opération plus fréquente mais rapide et peu contraignante, donc adaptée à l'activité principale des maraichers
- L'absence de nécessité d'inoculer le digesteur à chaque alimentation

Le type de digesteur le plus adapté est donc le digesteur piston.



5.2. Concept de l'installation de biogaz

Le schéma ci-dessous illustre les différents équipements qui constituent l'installation de biogaz pour les 2 types de digesteur piston considérés ;

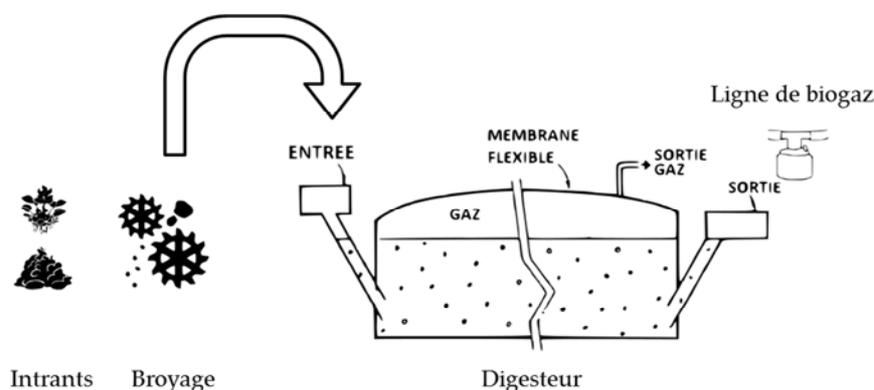


Figure 12 : Schéma d'une installation de biogaz avec digesteur piston fabriqué sur place

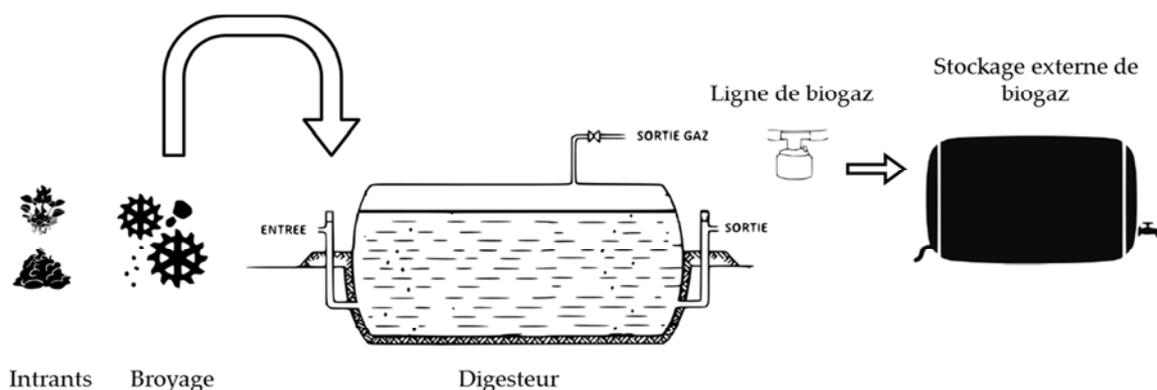


Figure 13 : Schéma d'une installation de biogaz avec digesteur piston préfabriqué

L'installation avec digesteur préfabriqué se différencie par l'ajout d'une capacité de stockage externe de biogaz.

La description de chaque partie constituant les installations est détaillée dans les paragraphes suivants.

5.2.1. Broyage des intrants

Avant leur introduction dans le digesteur, les intrants doivent être broyés.

Un broyage préalable permet d'une part de faciliter leur introduction dans le digesteur sans boucher la canalisation d'alimentation, et d'autre part de garantir un processus de digestion optimale. En effet, réduire la granulométrie des intrants augmente la surface d'échange avec les micro-organismes et accélère le démarrage du processus. Cela minimise également les risques de sédimentation.

Deux types de hachoir sont adaptés :



- Un hachoir manuel, utilisé anciennement pour hacher les orties : il nécessite d'être acheté déjà manufacturé, mais la simplicité du système maintient un faible coût. Ce type de hachoir est déjà utilisé pour préparer la jacinthe d'eau qui alimente l'unité de méthanisation du centre Songhaï de Porto Novo.



Illustration 11 : Hachoir manuel utilisé au Centre Songhaï

- Un hachoir à entrainement mécanique développé artisanalement au Vietnam : il est composé d'une structure cylindrique en métal, adapté à la taille d'un seau en plastique et de lames qui tournent selon un axe central. L'entrainement des lames est réalisé par une perceuse et le nombre de lames peut être augmenté pour plus d'efficacité. Sa simplicité lui confère un avantage car il peut être manufacturé sur place par des ateliers de soudure. Il peut être utilisé manuellement sans accès à l'électricité, mais son efficacité est alors diminuée.



Illustration 12 : Système de broyage utilisé au Vietnam

5.2.2. Digesteur

La forme du digesteur piston est caractérisée par une longueur supérieure à la largeur et à la profondeur, qui permet le brassage de son contenu grâce à l'écoulement piston [9].

Comme indiqué au § 5.1.3, le digesteur piston peut être construit sur place, avec des matériaux locaux, ou être préfabriqué.

- **Construit sur place vs préfabriqué**

Les digesteurs piston préfabriqués peuvent l'être à partir de 2 familles de matériaux : les plastiques flexibles et souples ou les plastiques solides et renforcés.

Les digesteurs en plastiques flexibles peuvent être fabriqués à partir de PVC (polyvinylchlorure) ou de PE (polyéthylène). Ils ont une forme de cylindre très allongé ou de sphère [10].

Bien que très bon marché et adapté aux pays de climat tropical, ils possèdent une durée de vie trop faible. Les matériaux, exposés aux rayons du soleil, subissent un vieillissement prématuré et sont facilement endommageables.

Concernant les digesteurs en plastiques renforcés, le plus représentatif, le FRP, est fabriqué à partir de polyester insaturé, de résine, de plastique renforcé de verre et de fibres de verre. La norme chinoise « NY/T 1699 » régit la fabrication de ce type de digesteur pour une application domestique.

Enfin, ce type de digesteur peut être construit sur place, à partir de briques et de ciment, matériaux peu onéreux et facilement disponibles.



Cependant, la construction de ce type d'ouvrage demande un certain savoir-faire pour le rendre totalement étanche. La composition du béton utilisé pour l'enduit doit permettre aux parois d'être étanches à l'eau et au gaz.

Un grand nombre de retours d'expérience montre que des fuites apparaissent après une période de fonctionnement qui peut s'avérer courte. Pour répondre à cette problématique, il est possible de remplacer la partie supérieure du digesteur, qui retient le biogaz, par une membrane imperméable (cf. § 5.2.4) [10]. Ceci permet de diminuer le temps nécessaire à la construction du digesteur.

Le digesteur pré-fabriqués en matériau composite possède plusieurs avantages par rapport au digesteur construit sur place. Il est en effet adapté aux régions :

- dont la nappe phréatique est affleurante
- au sein desquelles l'approvisionnement en matériaux de construction traditionnel est difficile
- au sein desquelles le savoir-faire en maçonnerie n'est pas suffisant pour garantir des constructions étanches à l'eau et au gaz

Cependant, ces digesteurs préfabriqués possédant des toits fixes, l'accès à l'intérieur du digesteur n'est plus possible, accès nécessaire pour effectuer d'éventuelles opérations de curage ou réparations. De plus, les volumes de digestion disponibles sont standardisés, ce qui nécessite l'adaptation de la quantité d'intrants alimentés au digesteur plutôt que l'adaptation du volume de digestion aux quantités d'intrants telles que fixées lors de cette étude.

Seule la construction d'un digesteur fabriqué sur place est développé par la suite.

▪ **Bacs d'alimentation et d'évacuation**

Le digesteur est pourvu d'un bac d'alimentation, à une de ses extrémités. Le bac est relié au digesteur par une conduite. Pour éviter les remontées de biogaz par cette conduite, celle-ci plonge dans la masse en cours de digestion.

À l'autre extrémité du digesteur la plus éloignée de la conduite d'alimentation se trouve la conduite d'évacuation du digestat, qui déverse le digestat dans un bac de stockage temporaire d'où il sera prélevé pour être valorisé.

L'alimentation du digesteur et l'évacuation du digestat se font sur le principe des vases communicants. Avant l'alimentation, le bac d'évacuation est vidé pour abaisser le niveau dans le digesteur et permettre d'introduire de nouveaux intrants par le bac d'alimentation.



Illustration 13 : Exemple de bac d'alimentation du digesteur et d'évacuation du digestat

5.2.3. Ligne de biogaz

La conduite de biogaz permettant d'évacuer le biogaz du digesteur peut être constituée d'acier galvanisé ou de PVC qui sont des matériaux résistants au biogaz. L'acier galvanisé est plus cher que le PVC, mais ce dernier est sensible aux rayons UV du soleil, il doit donc être protégé. Les conduites en PVC sont également plus faciles à installer.

Comme indiqué dans le § 3.3, pour éviter les nuisances liées à la présence d'hydrogène sulfuré (H_2S) et de vapeur d'eau dans le biogaz, il est nécessaire de traiter le biogaz pour éliminer ces gaz.

L'élimination de l'eau se fait par condensation naturelle dans la canalisation. L'eau condensée s'écoule jusqu'au point le plus bas où elle est collectée dans un puit. Il existe des systèmes simples et peu coûteux, tels que le « piège à eau ».

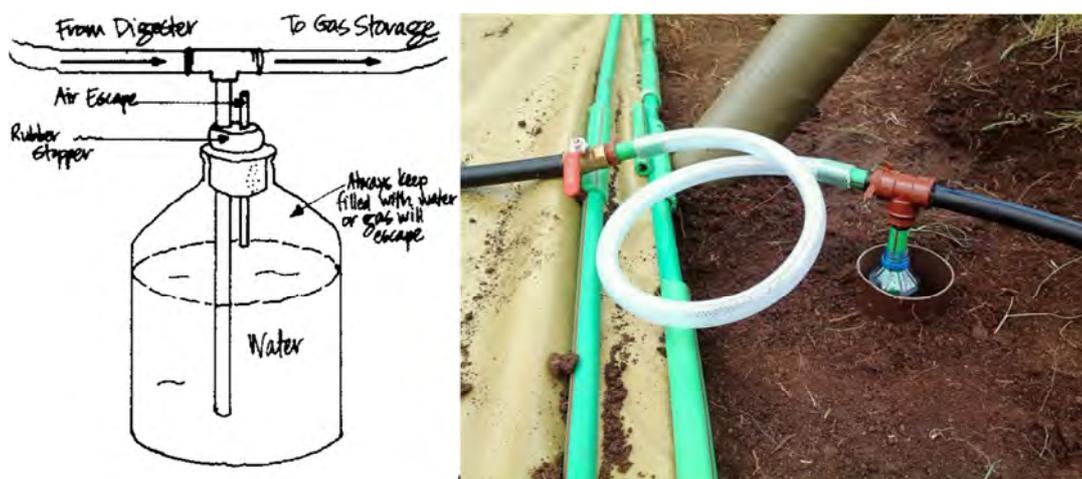


Illustration 14 : Fonctionnement et exemple d'un puit de condensation

Il consiste en un petit réservoir contenant un peu d'eau, et communiquant avec le conduit de biogaz par l'intermédiaire d'un tube en « T ». Il faut s'assurer que le tube soit immergé dans l'eau pour que le gaz ne s'échappe pas. L'eau s'écoule spontanément dans le réservoir, qui nécessite d'être partiellement vidé lorsqu'il est plein. Il est possible de construire ce condensateur très facilement avec des matériaux basiques tels qu'une bouteille en plastique et un tuyau de PVC en « T ».

Afin de favoriser la condensation de la vapeur d'eau, le piège à eau peut être enterré, à l'abri du soleil.

Lors de la condensation de la vapeur d'eau, une partie du H_2S contenu dans le biogaz est piégé car ce dernier est soluble dans l'eau.

Pour augmenter son élimination, la ligne de biogaz est pourvue d'un pot garni d'oxyde de fer ou de limaille de fer. Le biogaz, lors de son passage à travers le pot va réagir et y précipiter sous forme de sulfure de fer. Le garnissage peut ensuite être régénéré à l'air libre. Le bilan global est la transformation du H_2S en soufre natif.

Cependant, la mise en œuvre d'un filtre à H_2S est relativement complexe en comparaison avec la volonté de rendre l'exploitation de l'unité de méthanisation la plus simple possible. De plus, il est prévu de digérer majoritairement des matières végétales dans les unités de méthanisation, la teneur en H_2S du biogaz est susceptible d'être faible.

Dans un premier temps, la désulfuration n'est donc pas envisagée.



La ligne de biogaz peut éventuellement être équipée soupape de sécurité contre la surpression de biogaz, ainsi que d'un manomètre.

La soupape de sécurité permet de libérer le biogaz lorsque celui-ci n'est pas prélevé dans le digesteur et que la pression augmente. Cela permet d'éviter une surpression au sein du digesteur et ses mauvaises conséquences notamment sur la membrane (déchirement, etc.).

Ces équipements peuvent être fabriqués de façon très simple, comme le montrent les figures suivantes :

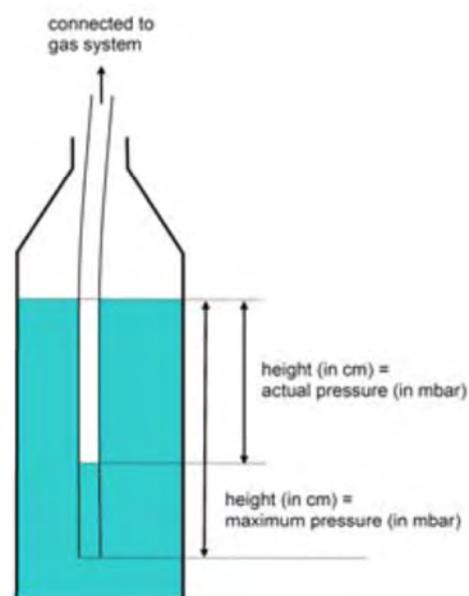


Illustration 15 : Exemple de soupape de surpression et principe de fonctionnement [4]

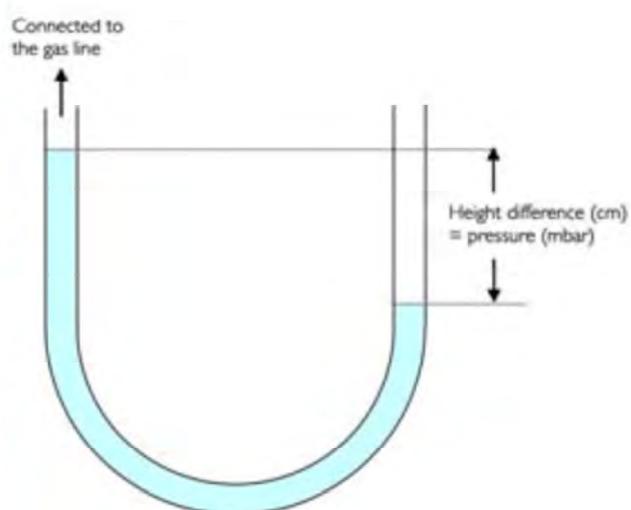


Illustration 16 : Exemple de manomètre et principe de fonctionnement [centre Songhai – Porto Novo / [4]]

5.2.4. Stockage du biogaz

Si le digesteur est pourvu d'une couverture souple, type membrane, alors il sert de réservoir pour le biogaz produit.

Pour éviter que la membrane ne retombe dans le digesteur en cas d'arrêt de la production de biogaz (problème biologique, curage prévisionnel), une charpente en bois ou un filet est installé dans le digesteur.



Illustration 17 : Exemple de membrane de stockage intégrée au digesteur [Source : Ecothane]

Le stockage externe de biogaz est nécessaire lorsque le digesteur n'est pas pourvu d'une capacité de stockage de biogaz, dans le cas ;

- d'un digesteur préfabriqué en plastique renforcé
- d'un digesteur fabriqué sur place dont la couverture est fixe, en béton ou en fer.

Le réservoir de stockage externe de biogaz est fabriqué en matériau souple : plastique « Red Mud » ou PVC, présentant un coût réduit à l'achat tout en fournissant la résistance nécessaire pour la fonction de stockage. Un exemple est représenté par l'illustration 18 :





Illustration 18 : Exemple de réservoir externe de biogaz

Pour transférer le biogaz entre ce stockage et les sacs de transport individuel (cf. § 6.1), il suffit d'appliquer une pression sur le réservoir, ce qui rend son utilisation intuitive et facile.

Qu'il soit intégré au digesteur ou externe, le réservoir de stockage du biogaz doit être protégé des intempéries au moyen d'un toit. Cela permet d'augmenter sa durée de vie.

5.3. Bilan-matière

Le bilan-matière est un outil qui permet de caractériser les flux qui traversent l'unité de digestion. Il donne des indications sur la quantité de biogaz et sur sa qualité. Il présente également les principaux éléments fertilisants qui permettent d'apprécier la qualité du digestat.

Ces flux permettent de dimensionner l'unité de digestion. Ils servent également de base aux réflexions sur la valorisation du digestat.

Les caractéristiques physico-chimiques de la jacinthe d'eau, nécessaires à l'élaboration du bilan-matière, ont été estimées grâce à une recherche bibliographique. Le tableau ci-dessous résume les résultats de cette recherche :

matière sèche	matière organique	carbone total	azote total	phosphore	potassium	source
MS	MO	C	N _{tot}	P ₂ O ₅	K ₂ O	
[% de MF]	[% de MS]	[% de MS]	[% de MS]	[% de MS]	[% de MS]	
5,8	78,9		2,93	1,4	3,2	[13]
9,84	85,02		1,60	0,64	4,97	[14]
6,9	74	32,4	1,2	1,15		[15]
4,7	77,7	41,1	1,96	1,05	1,79	[16]
5,5	80,4	40,3	1,51	0,89	0,47	[16]

Tableau 6 : Caractéristiques chimiques de la jacinthe d'eau issues de la littérature

Pour cette étude, nous nous baserons sur les caractéristiques chimiques suivantes :

- **MS = 6,5 % de MF**
- **MO = 79,2 % de MS**
- **C = 40 % de MS**
- **N_{tot} = 1,84 % de MS**
- **P₂O₅ = 1,04 % de MS**
- **K₂O = 2,6 % de MS**

Concernant le potentiel biogaz de la jacinthe d'eau, plusieurs publications donnent des résultats de tests de potentiels méthanogènes ou d'installations pilotes.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus ainsi que les conditions opératoires :



Potentiel biogaz	Teneur en méthane	Temps de séjour	Inoculum	Température de l'essai	Granulométrie	Type d'alimentation	source
[L _{biogaz} /kg _{MO}]	[%]	[jour]	[-]	[°C]			
630	70	90	digestat de jacinthes d'eau	29°C	5 – 6 cm	batch	[15]
400	70	50	digestat de jacinthes d'eau	29°C	0,6 – 1,2 mm	batch	[15]
128 à 279	54 à 65,4	17 à 30	digestat de jacinthes d'eau	29°C	0,6 – 1,2 mm	continu	[15]
118 à 305	57,4 à 66,2	12	digestat de jacinthes d'eau	35°C		continu	[16]
200 à 280	n.d.	60	n.d.	35°C	n.d.	n.d.	[17]
495	n.d.	54	résidus de panse issus d'abattoir	ambiante	7 cm	batch	[11]

Tableau 7 : Potentiels méthanogènes de la jacinthe d'eau issus de la littérature

Parmi ces résultats de potentiel biogaz, on peut différencier ceux obtenus par tests effectués en batch, au cours desquels les réactions anaérobies sont menées jusqu'à leur terme (50 à 90 jours). Les chiffres annoncés correspondent donc à la quantité maximale de biogaz susceptible d'être obtenue par digestion anaérobie de la jacinthe d'eau.

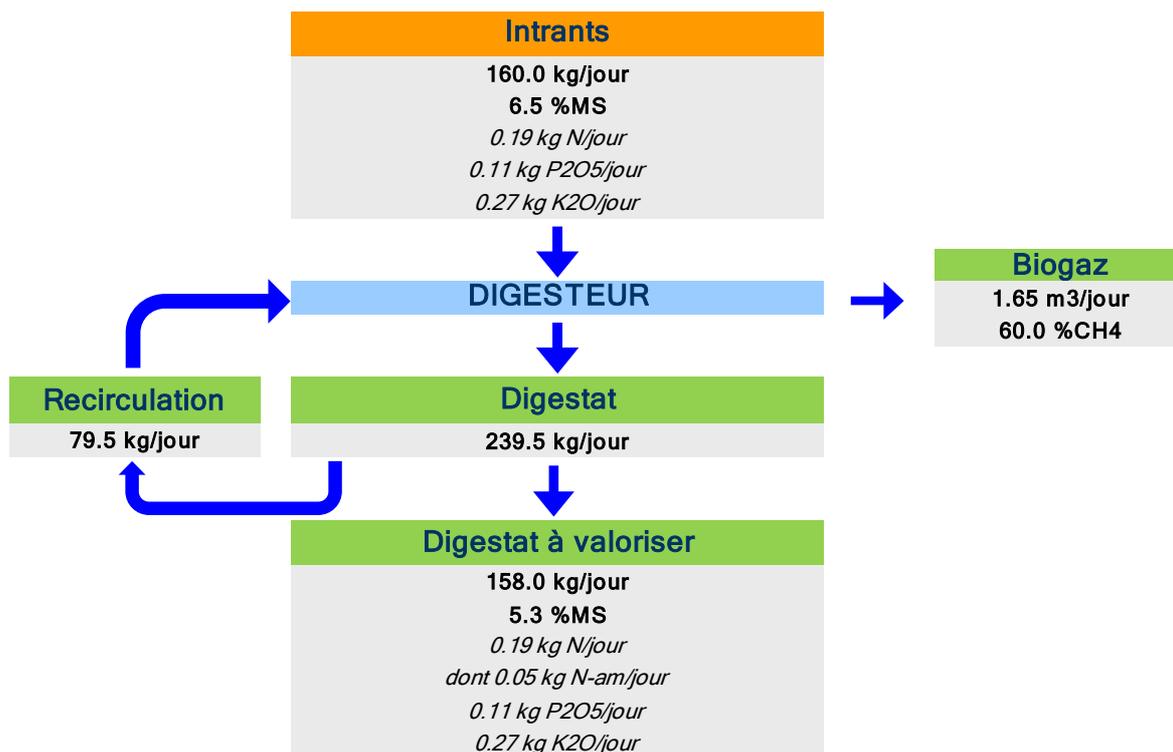
En fonctionnement continu, tel qu'il est prévu d'exploiter l'unité de méthanisation, le temps de séjour est plus court, de l'ordre de 30 jours. Il est donc plus judicieux de se baser sur les résultats des tests réalisés en mode continu.

Pour cette étude, nous nous baserons sur **un potentiel biogaz de 200 L_{biogaz}/kg_{MO}** et une **teneur en méthane du biogaz de 60%**.

Comme indiqué au § 3.1, la quantité annuelle de jacinthes d'eau servant d'alimentation à l'unité de méthanisation s'élèverait à **160 kg/jour**.

Compte tenu de ces données, le bilan-matière est le suivant :





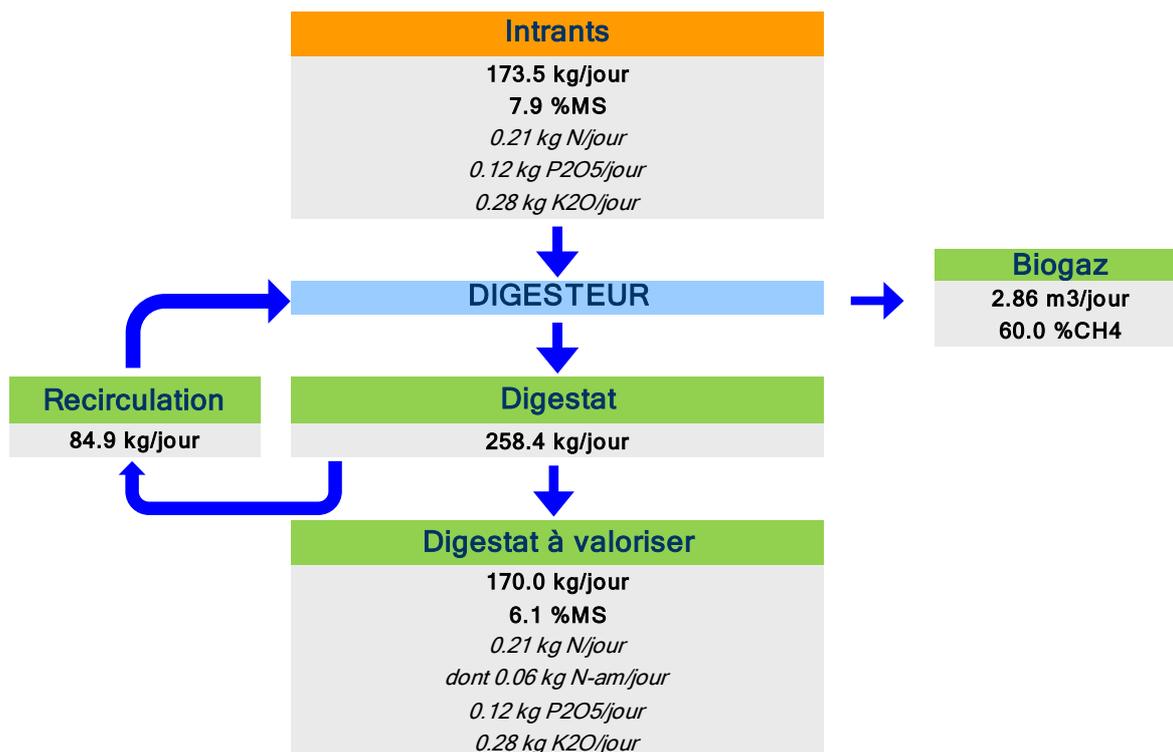
Tous les jours, 160 kg de jacinthes d'eau sont broyées et mélangées avec du digestat. Cette recirculation de digestat permet d'une part de faciliter l'introduction des jacinthes d'eau dans le digesteur, et d'autre part d'apporter les micro-organismes anaérobies nécessaires à un démarrage rapide de la digestion (=inoculer).

La production de biogaz serait ainsi de 1,65 m³/jour, soit 600 m³/an. Suivant l'estimation de la consommation de biogaz qui est faite, il est ainsi possible de couvrir les besoins de 9 à 17 personnes. Cela ne permet pas de couvrir les besoins de la population cible présentée au § 4 (ensemble des membres des familles se rattachant à un groupement de maraichers).

L'ajout des biodéchets produits par cette population cible, soit 13,5 kg/j., permettrait d'**augmenter la production de biogaz de 73% à 2,86 m³/jour**. Le bilan-matière est alors le suivant :



Tratament et valorisation
de déchets et
d'effluents organiques



Bien qu'ils soient apportés en moindre quantité, les biodéchets ont un potentiel biogaz et une teneur en matière sèche plus élevés que la jacinthe d'eau et augmentent la production de biogaz de façon non négligeable.

Au vu des quantités potentielles de biogaz qu'il est possible de produire en comparaison avec les consommations de biogaz de la population cible, on considère un scénario pour lequel les besoins de la population cible sont entièrement couverts par du biogaz. La quantité de biodéchets disponible étant limitée à ce que produit la population cible, le complément d'intrants nécessaires pour permettre une production de biogaz suffisante est constitué uniquement par des jacinthes d'eau.

Pour ce scénario, la quantité de biogaz nécessaire varie selon les estimations de **7,8 à 13,9 m³_{biogaz}/j.** pour la population cible.

600 à 1'240 kg de jacinthes d'eau par jour devraient alors être ramassées pour y parvenir, soit 4 à 8 fois plus que le scénario de base.

Le tableau ci-dessous résume les flux pour chaque scénario :

- Scénario 1 : le facteur limitant est la quantité de jacinthes d'eau collectées par les maraichers sans perturber leur activité principale
- Scénario 2 : la quantité de jacinthes d'eau du scénario 1 est digérée avec biodéchets produits par la population cible
- Scénario 3 : l'ensemble des besoins énergétiques de la population cible est couvert par le biogaz (cf. § 3.3 pour l'estimation des besoins énergétiques).



	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Quantité de jacinthes d'eau	160 kg/j.	160 kg/j.	600 à 1'240 kg/j.
Nb d'aller-retour vers la rive par jour	4	4	15 à 31
Quantité de biodéchets	-	13,5 kg/j.	13,5 kg/j.
Quantité de biogaz produit	1,65 m ³ /j.	2,86 m ³ /j.	7,39 à 13,9 m ³ /j.
Nombres de personnes fournies en biogaz	9 à 17 pers.	15 à 29 pers.	75 pers.

Tableau 8 : Résumé des résultats du bilan-matière pour chaque scénario

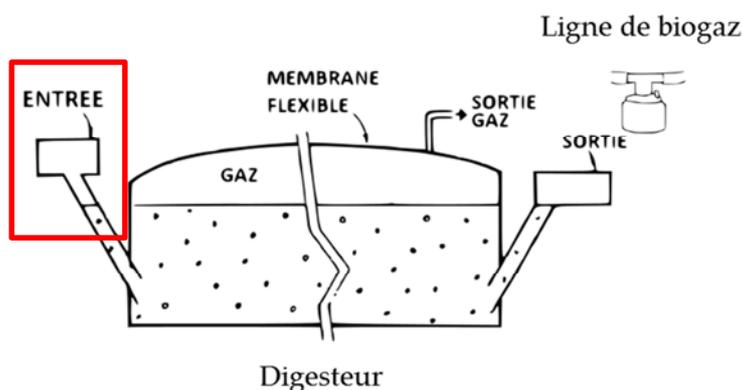


5.4. Dimensionnement et conditions opératoires

Le scénario 1 n'est pas envisagé. Bien qu'à la mise en service de l'installation de biogaz, les biodéchets ne seront pas triés par les ménages pour alimenter les digesteurs, il est nécessaire de dimensionner l'installation de biogaz pour une situation future où ils le seront.

On considère ici 2 dimensionnements pour une installation de biogaz alimentée par les scénarii 2 et 3.

▪ Bac d'alimentation

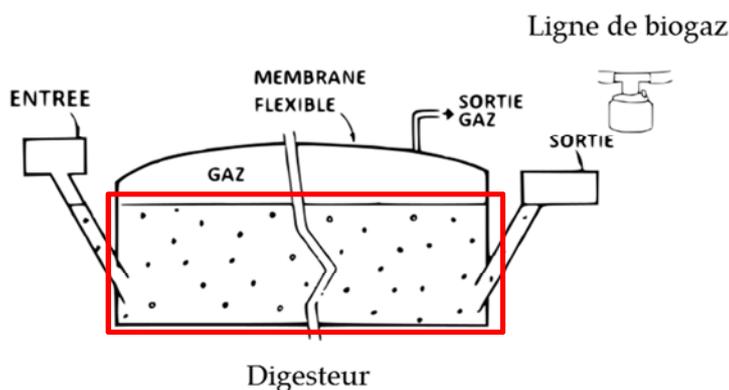


Le dimensionnement du bac d'alimentation du digesteur est calculé de sorte à contenir au maximum 1 jour d'alimentation en intrants. Il peut prendre une forme parallélépipédique ou circulaire. Son point le plus bas doit se trouver au-dessus du niveau du liquide à l'intérieur du digesteur.

Les intrants sont ensuite poussés, à l'aide d'un bâton par exemple, dans le digesteur par la canalisation qui relie le bac d'alimentation à ce dernier.

	Scénario 2	Scénario 3
Volume net	300 L	1 m ³ à 1,9 m ³

▪ Digesteur



Le dimensionnement du digesteur est calculé de telle sorte qu'un temps de rétention minimum des intrants au sein de celui-ci soit garanti, ici de 30 jours.

Ce volume obtenu est appelé « volume net ». Le « volume brut » du digesteur est supérieur car il tient compte du volume occupé par le biogaz. Ses dimensions sont calculées en tenant compte des principes suivants :

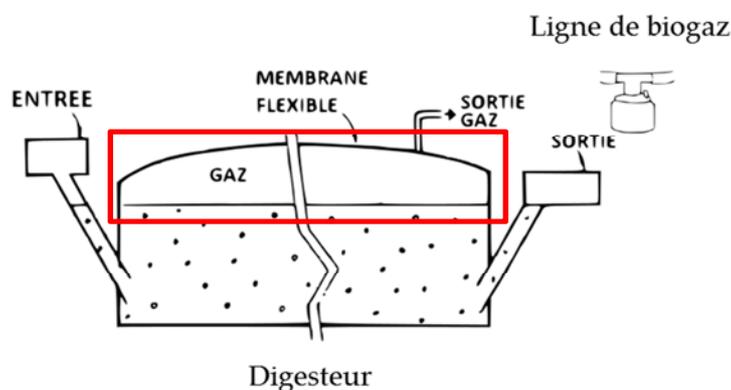
- hauteur = largeur
- longueur = 5 x hauteur

Les dimensions des digesteurs adaptés à chaque scénario sont données dans le tableau ci-dessous :

	Scénario 2	Scénario 3
Volume net	8 m ³	30 à 57 m ³
Hauteur / Largeur	1,17 m	1,82 à 2,25 m
Longueur	5,85 m	9,1 à 11,25 m

Le digesteur n'est pas chauffé. Le processus de digestion s'effectue à température ambiante qui varie de 22 à 35°C suivant la période de l'année.

▪ **Stockage de biogaz**



Le volume de stockage de biogaz nécessaire doit permettre de stocker le biogaz pendant au moins 2 jours, afin de prévenir l'éventualité d'une absence de prélèvement du biogaz par les utilisateurs (notamment le week-end).

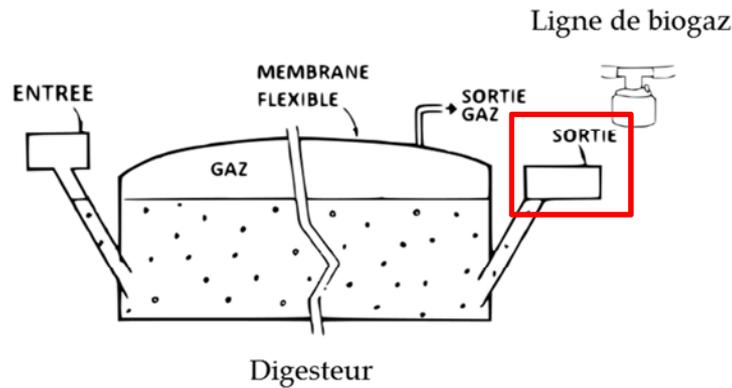
	Scénario 2	Scénario 3
Volume net	6 m ³	16 à 28 m ³

Pour un digesteur préfabriqué, ce volume de stockage est externe (cf. § 5.2.4.).

Pour un digesteur fabriqué sur place, ce volume de stockage est intégré au digesteur.



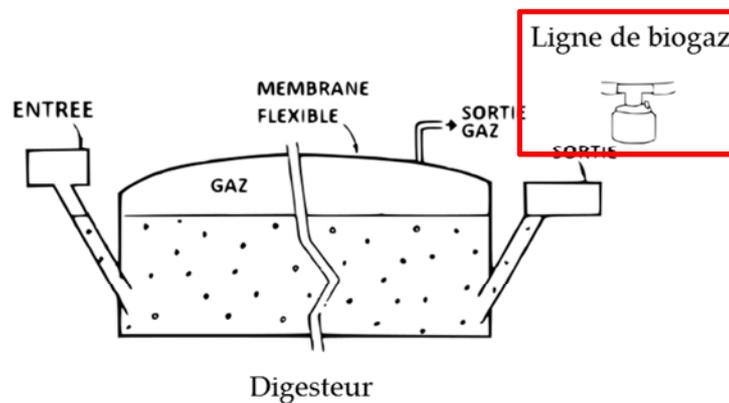
- **Bac de stockage du digestat**



Le dimensionnement du bac de stockage du digestat est calculé de sorte à contenir maximum 1 jour de production de digestat. Il peut prendre une forme parallélépipédique ou circulaire. Son point le plus bas doit se trouver au niveau du liquide à l'intérieur du digesteur.

	Scénario 2	Scénario 3
Volume net	300 L	1 m ³ à 1,9 m ³

- **Ligne de biogaz**



La taille de la conduite d'évacuation est déterminée par le débit d'extraction du biogaz. Pour une fréquence d'une extraction par jour à l'aide d'un sac à gaz, le diamètre de conduite doit être suffisamment grand pour minimiser le temps de remplissage du sac. Un diamètre de 1,5'' semble être adapté pour le scénario 2, et un diamètre de 2'' pour le scénario 3 [4].

La figure suivante présente la ligne de biogaz suggérée ainsi que les équipements qui la composent :



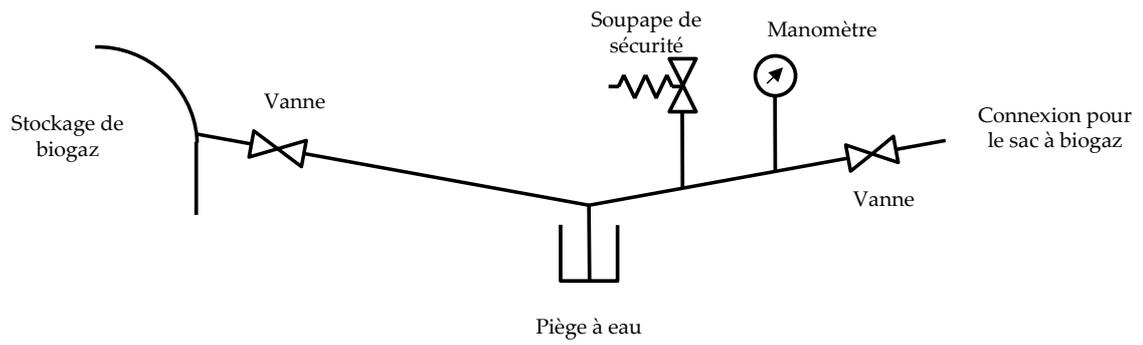


Figure 14 : Schéma de la ligne de biogaz

Le piège à eau, la soupape de sécurité ainsi que le manomètre, sont fabriqués avec des matériaux simples, voire de récupération (bouteille, seau, tuyaux flexibles, etc.).



6. VALORISATION DU BIOGAZ

OBJECTIFS :

- Concevoir un système de transport du biogaz sûr et approprié
- Étudier l'option de transport du biogaz à pression atmosphérique, à pied ou par pirogue, à l'aide d'enveloppes souples, mobiles. Ce système devra être fiable et à moindre coût. Il s'agit de déterminer quel produit est adéquat et de quantifier les besoins.

6.1. Transport

La solution technique permettant de transporter et de stocker le biogaz dans les foyers, est directement influencée par les contraintes du territoire d'étude. Comme dit précédemment, il n'existe pas d'infrastructures (réseau de gaz) pour transporter le biogaz. De plus, les lieux d'implantation des digesteurs, sur les parcelles des maraichers, sont éloignés des villages, lieu de consommation du biogaz.

Les habitants se déplacent à pied, ou par barque, donc le contenant de gaz doit être relativement léger et maniable.

La solution la plus adaptée est de transporter le biogaz dans des enveloppes souples qui peuvent se porter tel un sac à dos.



Illustration 19 : Sac à biogaz [source : (B)energy]

Le biogaz y est stocké à pression atmosphérique (ou légère surpression).

6.2. Valorisation

Le biogaz est valorisé par les ménages grâce à des brûleurs adaptés, directement alimentés par le biogaz stocké dans les sacs à gaz.





Illustration 20 : Brûleur à biogaz (centre Songhai, Porto Novo)

La connexion entre le sac à biogaz et le brûleur est réalisée avec une conduite en PVC équipée d'un piège à eau pour récupérer la vapeur d'eau condensée.

Afin d'augmenter la pression pour alimenter le brûleur en biogaz, un poids est placé sur le sac à biogaz, telle qu'illustré ci-dessous :



Illustration 21 : Pression exercée sur le sac à gaz [source : (B)energy]

Idéalement, le sac à biogaz est à séparer du brûleur pour éviter les risques d'explosion si le sac vient à percer brusquement. Il doit également être disposé à l'abri des rongeurs et de la lumière.

Le lieu de cuisson au biogaz doit être suffisamment aéré pour éviter les risques d'intoxication.

6.3. Bilan-énergie

Pour chaque scénario, le tableau ci-dessous reprend les données du bilan-énergie :

	Scénario 2	Scénario 3
Quantité de biogaz produit	2,86 m ³ /j.	7,39 à 13,9 m ³ /j.
Nombre de personnes fournies en biogaz	15 à 29 pers.	75 pers.
Nombre de ménages fournis en biogaz	3 à 6 ménages	15 ménages
Quantité de bois substituée	13,3 à 25,7 kg/j.	66,4 kg/j.

Tableau 9 : Bilan-énergie

Chaque ménage de la population cible est équipée d'un brûleur à gaz. Pour le scénario 2, la quantité produite ne permet d'alimenter chaque ménage en biogaz quotidiennement. Les ménages devront alors alterner entre le biogaz et le combustible traditionnel pour la cuisson des repas.



7. VALORISATION DU DIGESTAT

Lors du phénomène de méthanisation, les matières digérées subissent une transformation biologique dont les effets sur leurs caractéristiques chimiques et leurs propriétés sont décrits ci-dessous.

50 à 80% de la matière organique rapidement biodégradable est convertie en biogaz.

Le digestat contient la matière organique lentement biodégradable, en voie de stabilisation ainsi que la totalité des éléments fertilisants azote (N), phosphore (P) et potassium (K).

Ces éléments fertilisants sont en partie minéralisés lors du processus de méthanisation, les rendant rapidement assimilables par les plantes.

Ainsi, le digestat peut être considéré comme un amendement ainsi qu'un fertilisant.

Grace au bilan-matière, on estime les valeurs fertilisantes du digestat :

	Concentration
Matière sèche (MS)	58,1 g/L
Matière organique (MO)	43,7 g/L
Azote total	1,23 g/L
dont ammonium (NH ₄ ⁺)	0,22 g/L
Phosphore (P ₂ O ₅)	0,68 g/L
Potassium (K ₂ O)	1,66 g/L

Tableau 10 : Composition du digestat

Le digestat se présente sous forme liquide. Comme indiqué dans le § 2, il est destiné à un retour au sol. Son évacuation dans les eaux de surface est déconseillée car elle contribuerait à l'augmentation de la pollution du lac.

Le processus de méthanisation, notamment à température ambiante et sur des temps de séjour tels que choisis ici, n'a pas un effet hygiénisant nécessaire à l'élimination des virus et parasites. Cependant, les matières digérées n'étant pas constituées de déjections humaines ou animales, le digestat peut être utilisé pour tout type de culture, sans risque de contamination par des pathogènes.

Les maraichers de la commune de Sô-Ava pratiquent plusieurs cultures. On peut citer la culture du piment, du manioc, de la patate douce, de la tomate, de l'arachide, du maïs, du niébé [7].





Illustration 22 : Cultures de manioc et de patates douces

Lors des enquêtes menées par Pradelle [7] auprès des maraichers en 2013, il apparaît que certains utilisent des amendements organiques pour renouveler la fertilité des parcelles : fumiers collectés auprès d'éleveurs, jacinthes d'eau utilisées comme paillis pour maintenir l'humidité notamment. Depuis, certains groupements de maraichers ont été formés à la pratique du compostage de la jacinthe d'eau et l'utilisent désormais comme amendement.

Le digestat peut s'intégrer dans l'itinéraire de culture des maraichers, il est préconisé de l'utiliser lorsque les cultures ont de forts besoins en fertilisants, pendant leur croissance végétative. Compte tenu de sa forte teneur en eau, il permet également d'irriguer les cultures simultanément à la fertilisation.

Enfin, la pratique du compostage nécessitant un arrosage régulier du tas en cours de compostage, il peut être tout à fait envisagé d'utiliser le digestat en alternance avec l'eau déjà utilisée.



8. ANALYSE ÉCONOMIQUE

L'analyse économique est effectuée seulement pour le scénario 2. En effet, une des conditions de l'implantation de l'unité de méthanisation étant l'intégration de son exploitation dans l'activité principale des maraîchers, les quantités de jacinthes d'eau à collecter pour le scénario 3 (cf. § 5.3) sont trop importantes pour ne pas venir la perturber.

8.1. Investissements

Les coûts d'investissement relatifs aux différents ouvrages et équipements constituant l'installation ont été évalués au moyen de différentes consultations :

- Entrepreneur local pour la partie gros-œuvre
- Centre Songhaï de Porto-Novo pour les équipements façonnés en chaudronnerie : broyeur, brûleur
- Fournisseurs européens pour les stockages de biogaz : gazomètre, sac à gaz

Préparation des intrants		FCFA 300'000	CHF 498
Broyeur à couteaux		300'000	498
Digesteur		FCFA 1'011'200	CHF 1'680
Bac d'alimentation en béton ou brique	300 L	39'600	66
Conduite d'alimentation du digesteur en PVC		18'000	30
Digesteur	8 m ³	458'000	761
Couverture sous forme de membrane hermétique au biogaz et ancrage	≈ 10 m ²	328'000	545
Charpente en bois		110'000	183
Conduite d'évacuation du digestat		18'000	30
Bac d'évacuation du digestat	300 L	39'600	66
Ligne de biogaz		FCFA 7'000	CHF 12
Conduite de biogaz en PVC		2'000	3
Vannes		2'000	3
Piège à eau		1'000	2
Soupape de surpression		1'000	2
Manomètre		1'000	2
Transport du biogaz		FCFA 85'608	CHF 142
Sac à biogaz équipé (vanne, ...)	× 3	85'608	142
Valorisation du biogaz chez les ménages		FCFA 420'000	CHF 698
Conduite de biogaz en PVC	× 15	30'000	50
Piège à eau	× 15	15'000	25
Brûleur à biogaz	× 15	375'000	623
Travaux divers		FCFA 123'305	CHF 205
Terrassement		18'305	30
Toit		105'000	174
Ingénierie, montage		FCFA 325'000	CHF 540
Ingénierie		150'000	249
Montage		175'000	291
Imprévus (10%)		FCFA 227'211	CHF 378
MONTANT TOTAL DES INVESTISSEMENTS (HT)		FCFA 2'499'324	CHF 4'153



8.2. Financement de l'installation de méthanisation

Classiquement, le financement d'une installation de méthanisation se fait par un emprunt bancaire. Les emprunts bancaires ne sont pas courants au Bénin. La population cible n'a accès qu'à des micro-crédits. Cependant ce type de dossiers a de faibles chances d'être accepté par les institutions de microfinances. Cela est dû au fait que l'installation de méthanisation dans ce contexte local n'a pas de retour financier mais plutôt des bénéfices économiques et environnementaux. Pour cette raison, non seulement les institutions de microfinances seront réticentes mais aussi les maraîchers ne seront pas intéressés à monter un dossier à cet effet.

Or, le diagnostic sur le terrain a montré que ces derniers sont intéressés par cette innovation. En conséquence, la participation de la population cible ne sera que par des éléments essentiels à l'installation mais dont dépendent les maraîchers pour utiliser le biogaz, le brûleur par exemple. Par cette considération, ils pourraient participer au financement à hauteur d'environ 15%.

Nous formulons donc 2 hypothèses :

- Hypothèse 1 : Financement de l'investissement par subvention
- Hypothèse 2 : Financement de l'investissement par subvention avec participation de la population cible à hauteur de 15%

	Hypothèse 1	Hypothèse 2
Subvention à l'investissement	2'500'000 FCFA 4'154 CHF	2'125'000 FCFA 3'531 CHF
Participation de chaque ménage à l'investissement	-	25'000 FCFA 41,5 CHF

Tableau 11 : Hypothèses de financement

8.3. Frais d'exploitation

▪ Réparation et entretien

Réparation & entretien			
Part de l'investissement gros-œuvre	1 %		
Part de l'investissement équipements	2 %		
Répartition investissements			
Gros-œuvre	85.5 %		
Équipements	14.5 %		
Réparation / entretien gros-œuvre		21'377 FCFA/an	CHF 36
Réparation / entretien équipements		7'232 FCFA/an	CHF 12
		TOTAL 28'609 FCFA/an	CHF 48



▪ **Consommables, analyses, contrôles**

Consommables, analyses, contrôles méthanisation			
Pourcentage sur investissement	0.2 %		
		TOTAL	4'999 FCFA/an CHF 8

8.4. Recettes

Les recettes doivent permettre de couvrir :

- les frais d'exploitation détaillés dans le § 8.3
- ainsi que les investissements nécessaires pour le renouvellement de certains équipements de l'unité de méthanisation, évalués à 181'000 FCFA tous les 5 ans.

Il est envisagé de faire participer les ménages sous forme d'une cotisation mensuelle pour constituer ces recettes. Pour rappel, la population cible est constituée de 15 ménages en moyenne par installation.

Ainsi, **la cotisation mensuelle s'élèverait à 400 FCFA/ménage**, soit 69 FCFA/m³_{biogaz} (11,5 cCHF/m³_{biogaz}).



9. BÉNÉFICES

Le potentiel de production de biogaz à partir de jacinthes d'eau est conséquent, au regard de la forte prolifération de cette plante.

La méthanisation de la jacinthe d'eau en codigestion avec les biodéchets des ménages permet de répondre à plusieurs problématiques.

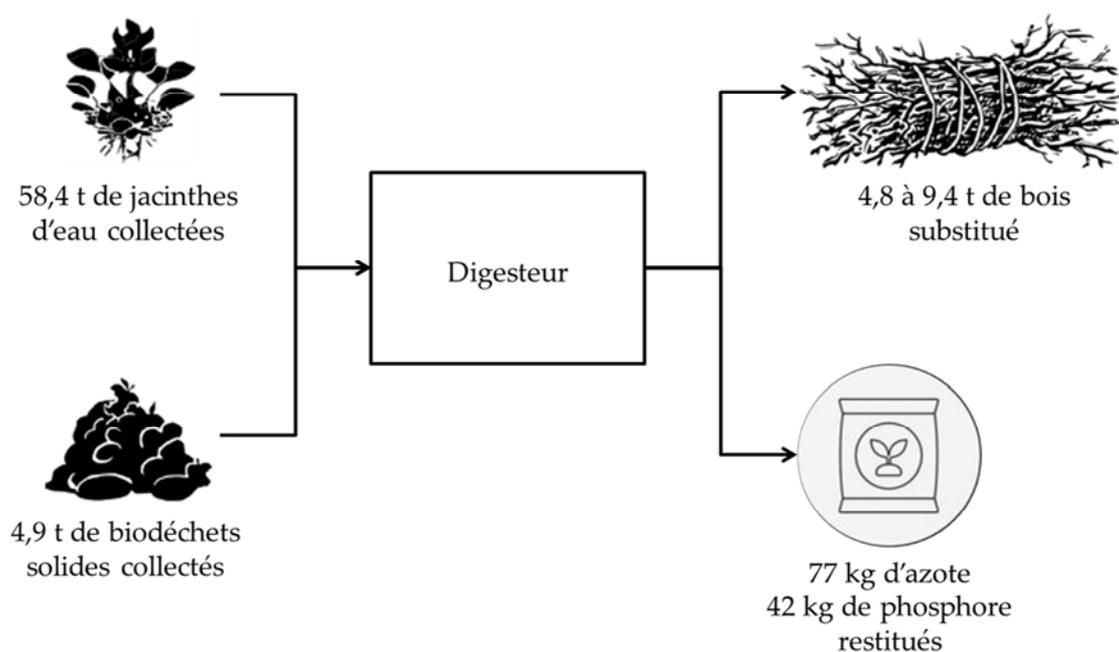
La collecte de la jacinthe d'eau pour l'alimentation du digesteur participe à la lutte contre cette plante envahissante et diminue dans une moindre mesure les conséquences négatives de sa prolifération sur le lac.

Le tri et la collecte des biodéchets solides des ménages pour l'alimentation du digesteur participent à la lutte contre l'insalubrité dont l'absence de gestion des déchets est une des nombreuses causes.

La valorisation du biogaz pour couvrir les besoins d'énergie pour la préparation des repas substitue le bois actuellement utilisé et donc diminue la pression sur les ressources forestières.

Le digestat, valorisé sur les cultures maraichères, restitue des fertilisants et de la matière organique à des terres dont la fertilité n'est pas systématiquement renouvelée.

Selon les hypothèses développées dans cette étude, pour 1 unité de méthanisation et par an construite selon le scénario 2, les bénéfices réalisés seraient les suivants :



CONCLUSIONS

L'étude montre qu'il existe une technique de digestion adaptée aux intrants considérés et aux conditions béninoises : le digesteur pison, ainsi qu'une solution technique permettant de transporter le biogaz vers les consommateurs : le sac à gaz.

L'implantation des unités de méthanisation est restreinte aux parcelles maraichères non inondables et leur exploitation serait réalisée par les groupements de maraîchers. C'est à ces derniers que le digestat et le biogaz bénéficieraient.

Sur le territoire de la commune de Sô-Ava, certains villages étant construits entièrement sur des zones inondables, l'ensemble de la population ne pourra donc pas être concerné par la construction d'une unité de méthanisation.

La construction d'une unité pilote est tout à fait envisageable. Elle permettra de lever certaines incertitudes telles que le potentiel méthanogène de la jacinthe d'eau, ou la part de la consommation de bois de feu des ménages qui serait substituée par le biogaz.

Quelques difficultés peuvent déjà être mentionnées, telles que la mise en place du tri des biodéchets des ménages, le manque de savoir-faire dans la construction de digesteur, ou la nécessité de former les maraîchers à l'exploitation de l'unité de méthanisation et à l'utilisation du digestat sur leurs cultures.

