



Filière biogaz à Madagascar : Support décisionnel pour une meilleure exploitation des biodigesteurs communautaires dans les prisons

Par Jérémy JOUSSELIN

Mémoire de fin d'étude Master 2
Gestion des Infrastructures & Services
Option Eau et Assainissement M2 GIS EA
Etude à distance

Promotion 2017 – 2018
2iE - Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
Ouagadougou BURKINA FASO

Remerciements

Je tiens à remercier très sincèrement Monsieur Olivier Bernard, ancien chef de secteur pour l’Afrique au sein du département Eau et Habitat du Comité International de la Croix Rouge (CICR) car sans son appui au niveau de notre siège à Genève en Suisse, ce mémoire de recherche n’aurait pas pu voir le jour.

Mes remerciements chaleureux se tournent également vers mes collègues du CICR de la délégation régionale de l’Océan Indien qui m’ont soutenu moralement pour ces travaux de recherche et de rédaction. Un grand merci inconditionnel à mes proches et ma famille qui m’ont toujours apporté leur soutien même dans les moments de doute.

Je remercie aussi l’ensemble du personnel de l’Administration Pénitentiaire de Madagascar et particulièrement le Service de la Normalisation et de l’Humanisation des Conditions de la Détention ainsi que le Service de la Gestion du Patrimoine Immobilier avec qui nous avons étroitement travaillé pour la réalisation de ce projet professionnel de diagnostic.

Résumé

Le système de biodigesteur communautaire des prisons dans les pays en voie de développement est un moyen d'améliorer les conditions de détention par la production d'une source d'énergie plus propre que les sources d'énergie traditionnelles (bois de chauffe et charbon) et par la valorisation des effluents sortants du système (digestat).

Après plus de deux années d'exploitation, il a été constaté que les deux biodigesteurs installés dans deux prisons distinctes, sur les 43 prisons de Madagascar, ne sont pas à un niveau optimal de production de méthane et qu'aucune valorisation des effluents n'a été mise en place. Un diagnostic complet sur sites de l'état de fonctionnement des 2 systèmes de traitement par digestion anaérobique des boues des latrines de ces prisons était nécessaire afin de rechercher des solutions durables de production optimale de méthane et afin de rechercher les différentes voies de valorisation des effluents en sortie du système biogaz.

Cette étude de fonctionnement, qui s'est étalée sur 6 mois, a permis de mettre en évidence des dysfonctionnements au niveau de la maintenance et de l'entretien régulier du système d'assainissement engendrant entre autre une sous production de méthane. Des besoins en alimentation régulière par des types de déchets organiques plus diversifiés afin d'augmenter la production du biodigesteur a aussi pu être démontrée. Enfin, fort est de constater qu'un potentiel non négligeable de valorisation des rejets sortants en « engrais vert » est possible par des installations abordables financièrement mais nécessitant tout de même un suivi régulier par l'homme.

Notons que ce rapport est conçu pour fournir un support informatif et décisionnel pour l'amélioration des conditions d'exploitation des biodigesteurs.

Rappelons qu'il faut considérer le caractère très spécifique des solutions proposées car elles sont adaptées au contexte complexe du milieu carcéral qui comprend des contraintes uniques en termes de moyens financiers et de gestion limitée des ouvrages dépendant le plus souvent de la bonne volonté des prisonniers supervisés par les agents pénitenciers de l'Administration Pénitentiaire malgache.

Mots clés

- 1- Biodigesteur anaérobique
- 2- Production
- 3- Valorisation
- 4- Maintenance
- 5- Traitement

Summary

The use of community scale biodigester facility within the penitentiary system in developing countries has led to significant improvements in detention conditions. Firewood/charcoal, traditional source of combustion is replaced with biogas produced via the treatment of sewage and organic waste (digestat).

Of the pilot biodigester facilities installed in 2 of Madagascar's 43 prisons, none is currently operating at its optimal levels of methane production in over 2 years of operation. No process was put in place to efficiently exploit the organic waste. A complete on-site diagnosis of the operational system on anaerobic digestion of fecal sludge was necessary to identify both sustainable solutions for methane production as well as to look for ways to optimize digester effluents outputs of the biogas system.

This diagnosis, which ran for over 6 months, identified systemic malfunctions in regular maintenance of the sanitation system resulting in sub-production of methane among other issues. It was demonstrated that regular input of organic waste of a diversified nature would significantly increase the biodigester production. Finally, the potential for recovering effluent outputs for use as "green manure" is possible through facilities that though affordable financially, still nevertheless require regular human monitoring.

It is worth noting that this report is designed to provide informative and decisional support for the improving the operating conditions of biodigesters.

Consideration must be taken for the very specific nature of the proposed solutions that need to be adapted to the complex prison environment. These unique constraints usually in the form of limited financial resources as well as resource management often dependent on the goodwill of prisoners supervised by the penitentiary agents of the Malagasy Penitentiary Administration.

Key words

- 1- Anaerobic bio digester
- 2- Production
- 3- Valuation
- 4- Maintenance
- 5- Treatment

Table des matières

| | | |
|----------|--|----|
| I. | Introduction | 1 |
| II. | Cadre de l'étude | 3 |
| II.1 | Système de digestion anaérobie dans le monde et les pays en voie de développement..... | 3 |
| II.1.1 | Développement progressif de la technologie biogaz à Madagascar..... | 4 |
| II.1.2 | Type de digesteurs..... | 5 |
| II.1.2.1 | Biodigesteur dit « maçonné »..... | 5 |
| II.1.2.2 | Biodigesteur dit « non-maçonné » | 6 |
| II.1.3 | Principes et conditions de digestion anaérobie | 8 |
| II.2 | CICR, précurseur du Biogaz en milieu carcéral en Afrique | 8 |
| II.3 | Biogaz dans les prisons à Madagascar..... | 9 |
| III. | Objectifs de l'étude et hypothèse de travail | 10 |
| IV. | Matériels & méthodes..... | 12 |
| IV.1 | Diagnostic du système biogaz à la MF de Tsiafahy | 12 |
| IV.1.1 | Description du système | 12 |
| IV.1.2 | Contrôles et mesures réalisés | 15 |
| IV.2 | Diagnostic du système biogaz à la MC de Maevatanana | 16 |
| IV.2.1 | Description du système | 16 |
| IV.2.2 | Contrôles et mesures réalisés | 17 |
| IV.3.3 | Etude environnementale..... | 18 |
| V. | Résultats & discussion | 20 |
| V.1 | Résultats & solutions mises en place à la MF de Tsiafahy | 20 |
| V.1.1 | Une amélioration O&M indispensable..... | 20 |
| V.1.2 | Une production de gaz à améliorer..... | 21 |
| V.1.3 | Une charge organique trop faible des effluents entrants..... | 22 |
| V.1.4 | Une composition de gaz optimale..... | 23 |
| V.1.5 | Des analyses révélatrices de dysfonctionnements | 23 |
| V.1.6 | Etat général encourageant du système biogaz | 26 |
| V.2 | Résultats & solutions mises en place à la MC de Maevatanana | 27 |
| V.2.1 | Une amélioration O&M indispensable..... | 27 |
| V.2.2 | Consommation de gaz et évolution de la pression | 28 |
| V.2.3 | Une charge organique trop faible des effluents entrants..... | 31 |
| V.2.4 | Une composition de gaz optimale..... | 32 |
| V.2.5 | Des analyses révélatrices de dysfonctionnements | 32 |
| V.2.6 | Impact sanitaire et enjeux environnementaux | 34 |
| V.2.7 | Etat général mitigé du système biogaz | 35 |
| VI. | Conclusion et perspectives..... | 36 |

| | | |
|-------|-----------------------------------|----|
| VII. | Références | 38 |
| VII.1 | Références bibliographiques | 38 |
| VII.2 | Références de sites internet..... | 39 |
| VIII. | Annexes | 39 |

Liste des figures

Figure 1 : Coupe verticale d'un biodigesteur à dôme fixe en béton armé

Figure 2 : Digesteur à dôme flottant, site de production de biogaz du marché de Tuléar, Madagascar

Figure 3 : Biodigesteur non-maçonnerie flexible, quartier défavorisé de Antananarivo, Madagascar

Figure 4 : Digesteurs 100 m³ en série – Prison Rwanda

Figure 5 : Vue du biodigesteur à la MF de Tsiafahy

Figure 6 : Vue du biodigesteur à la MC de Maevatanana

Figure 7 : Zone d'étude et milieu naturel de la MC de Maevatanana

Figure 8 : Module de formation sur le fonctionnement du biodigesteur

Figure 9 : Broyage des déchets organiques additionnels par les détenus

Figure 10 : Bâche de stockage de méthane de capacité de 2 m³

Figure 11 : Filtre à sable pour un post traitement naturel du digestat

Liste des tableaux

Tableau 1 : Equivalence de production d'énergie pour 1 m³ de biogaz produit

Tableau 2 : Synoptique du système biogaz pour la MF de Tsiafahy et la MC de Maevatanana

Tableau 3 : Résultats des analyses en laboratoires de l'effluent pour la MF de Tsiafahy

Tableau 4 : Aperçu général des résultats obtenus du diagnostic pour la MF de Tsiafahy

Tableau 5 : Résultats des analyses en laboratoire de l'effluent pour la MC de Maevatanana

Tableau 6 : Liste des impacts sur l'environnement du biogaz à la MC de Maevatanana

Tableau 7 : Aperçu général des résultats obtenus du diagnostic pour la MC de Maevatanana

Liste des acronymes

| | |
|----------------|---|
| AP | Administration Pénitentiaire |
| DA | Digestion Anaérobie |
| DCO | Demande Chimique en Oxygène |
| INSTAT | Institut National de la Statistique de Madagascar |
| MC | Maison Centrale (prison Provinciale) |
| MES | Matière en Suspension |
| MF | Maison de Force (prison de Haute Sécurité) |
| MVS | Matières Volatiles Sèches |
| O&M | Opération & Maintenance |
| STEP | Station d'épuration des eaux usées |
| TRH | Temps de rétention hydraulique |

I. Introduction

Le changement climatique et ses conséquences dramatiques sur notre environnement sont de réels challenges auxquels des réponses devront être trouvées afin de préserver les écosystèmes et protéger les ressources naturelles de notre Planète. La diminution progressive et irréversible des hydrocarbures fossiles est une réalité à laquelle il faudra faire face dans le futur en envisageant entre autre l'utilisation d'autres sources d'énergies plus « vertes » et plus respectueuses de notre environnement naturel.

L'île de Madagascar, quatrième plus grande île au monde située au sud-est du continent africain dans l'Océan Indien, composée de 26 millions d'habitants, subit de plein fouet les impacts négatifs du changement climatique. Ces modifications du climat perturbent les calendriers agricoles, les processus biologiques et les ressources naturelles dont dépend la population malgache (GIZ, 2018).

A l'heure où il est maintenant indéniablement nécessaire de prendre des mesures d'urgence pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions (PNUD, 2019), les technologies pour le développement durable devront être de plus en plus utilisées et cela à grande échelle.

Le biogaz, qui possède un grand potentiel pour mieux lutter contre les changements climatiques, doit faire partie du mixte énergétique car il complète les énergies renouvelables comme l'éolien ou le solaire. C'est un allié de taille pour propulser la transition énergétique (Biogasworld, 2019). Le dernier rapport du GIEC¹ sur l'évolution du climat mentionne que le développement des installations biogaz est une des solutions pour une atténuation des conséquences négatives du changement climatique (GIEC, 2018). La production de biogaz dans une perspective de développement durable et écologique, fait partie d'une des solutions applicables à grande échelle au niveau planétaire afin de réduire les émissions de dioxyde de carbone et de méthane dans l'atmosphère. Cette technologie biogaz est en mesure de répondre aux problématiques économiques, de santé, sociales et environnementales (Mengistu et Al., 2015).

Contrairement aux pays d'Asie où l'on dénombre près de 43 millions de système biogaz dont 4.7 millions en Inde, 300'000 au Népal ou encore 180'000 au Vietnam, la technologie des biodigesteurs n'est pas extrêmement populaire à Madagascar avec un total de 400 unités domestiques et seulement 14 de biodigesteurs communautaires installés et exploités (ETC Rongead, 2017). Ce nombre comprend les deux unités installées par le CICR pour le compte de l'AP dans 2 prisons dont le présent rapport fait l'objet ! De nombreux pays d'Amérique Latine et d'Afrique dont Madagascar partagent la volonté de développer la

¹ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

technologie biogaz par des programmes biogaz de plus en plus nombreux appuyés par les secteurs privés, humanitaires et gouvernementaux.

Madagascar possède de considérables capacités en énergie renouvelables mais sous-utilisées. En plus de ce constat, la principale source d'énergie pour les ménages malgaches vient du bois de chauffe et du charbon ce qui fait subir aux forêts et à l'ensemble de la biodiversité de l'île un « stress » sans pareil. Les besoins en bois de chauffe risquent d'excéder les réserves d'ici 2050 sur la Grande Ile et les besoins en charbon excéderont l'offre d'ici 2030 (WWF, 2012).

C'est dans ce contexte que la délégation régionale pour l'Océan Indien du CICR², organisation humanitaire neutre et indépendante, a décidé en 2014 à la demande de l'Administration Pénitentiaire et dans le but d'apporter des réponses adaptées aux contextes de Madagascar, de financer et construire deux projets de production de biogaz communautaires dans 2 prisons, respectivement à la prison de Haute Sécurité de Tsiafahy et à la prison centrale de Maevatanana. Par les Conventions de Genève, le CICR a reçu le mandat de visiter les prisonniers de guerre et les internés civils en période de conflit. Les visites du CICR ont pour but de garantir que les détenus sont traités avec humanisme et le CICR collabore avec les autorités pour prévenir les abus et améliorer les conditions de détention (CICR, 2019).

A partir de 2002, le CICR a réalisé l'implantation de systèmes d'assainissement biogaz communautaires dans 3 prisons du Rwanda, 5 prisons au Népal et 5 prisons aux Philippines. La technologie du traitement des eaux usées fonctionnant par bio-digestion est efficace et écologique et a donc amené le CICR à développer ce système dans les prisons comme moyen efficace de substitution aux fosses septiques. En janvier 2012, le CICR a publié à l'interne un rapport rédigé par Mr. Christian Riuji LOHRI d'Eawag³ sur l'état des systèmes d'assainissement biogaz installés dans les prisons du Rwanda, Philippines et Népal. Cet excellent document présentait des éléments permettant d'évaluer la pertinence des systèmes de biogaz ainsi que des points importants concernant le suivi des performances des systèmes existants. Sachant que ce document traitait de manière assez succincte les contraintes d'exploitation des ouvrages sans aborder de manière approfondie la question de valorisation et du traitement du digestat, il était pertinent qu'une capitalisation des expériences acquises dans l'exploitation des biodigesteurs à Madagascar soit réalisée dans ce mémoire en complément de l'expérience acquise dans les autres contextes.

Le développement à plus grande échelle de cette technologie de traitement efficace des eaux usées et écologique par bio-digestion dans la filière assainissement amène le CICR à être intéressé par de nouvelles

² Comité International de la Croix Rouge

³ Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology

recherches qui vont, à l'avenir, contribuer à des connaissances encore plus poussées de la situation du système biogaz communautaire applicable en milieu carcéral.

Ce mémoire a pour objectif principal de réaliser un bilan sur les technologies de biogaz à Madagascar et d'ainsi mettre en lumière les différents avantages, inconvénients, potentiels et enjeux de cette filière biogaz sur la Grande Ile. Notre recherche et nos analyses s'appuieront sur les biogaz communautaires exploités actuellement en milieu carcéral dans lequel travaille le CICR.

Ce mémoire s'articulera sur 3 grands axes. Dans le cadre général de l'étude et afin de bien comprendre le contexte de travail, nous rappellerons tout d'abord les principes fondamentaux de la digestion anaérobie et les différentes technologies utilisées dans le contexte malgache. Ensuite, les diagnostics de terrain réalisés pour chacune des prisons étudiées seront présentés en détail. La troisième partie traitera des résultats établis à partir de diagnostics de performances des deux systèmes de biogaz. Les analyses de ces résultats seront étudiées et permettront de mettre en évidence des éléments de solutions proposées pour l'amélioration de l'exploitation de ces biodigesteurs. Nous conclurons ce rapport par une analyse et une synthétisation des enjeux majeurs de la filière biogaz à Madagascar en milieu carcéral et de la filière biogaz dans une approche plus globale.

II. Cadre de l'étude

II.1 Système de digestion anaérobie dans le monde et les pays en voie de développement

Ce mémoire de recherche qui traite des systèmes d'assainissement biogaz est tout à fait d'actualité quand on sait qu'un des objectifs de développement des Nations Unies est l' « eau propre et l'assainissement ». Effectivement, il est clairement mentionné par le PNUD que d'ici à 2030, le but est de « développer la coopération internationale et l'appui au renforcement des capacités des pays en développement en ce qui concerne les activités et programmes relatifs à l'eau et à l'assainissement, y compris la collecte de l'eau, la désalinisation, l'utilisation rationnelle de l'eau, le traitement des eaux usées, le recyclage et les techniques de réutilisation ». Selon la Banque mondiale (2018), plus de 3 milliards d'individus dans le monde cuisinent encore au charbon ou au bois, provoquant ainsi des émanations toxiques responsables de millions de décès prématurés par an. Cuisiner avec du biogaz combustible et/ou s'éclairer avec du biogaz produit dans un digesteur par la fermentation des matières organiques sans présence d'air, permet de diminuer cette pollution et les émissions de gaz à effets de serre, de combattre la déforestation et d'améliorer le quotidien de millions de ménages principalement chez les agriculteurs.

Les Asiatiques, notamment les Chinois et les Indiens, ont été les précurseurs dans le monde pour l'utilisation du biogaz. Ces derniers ont développé une expertise sur les biogaz domestiques reconnue mondialement de part une implantation à grande échelle surtout au niveau des ménages dans les zones rurales agricoles.

L'Europe est aussi un très bon exemple récent en matière d'augmentation de la production de biogaz avec un potentiel économique énorme sur le marché florissant des énergies renouvelables. En effet, la production de biogaz a augmenté au sein de l'Union Européenne pour atteindre en 2015, 18 milliards de m³ de méthane. L'Europe est le leader mondial de production électrique par biogaz avec 17'400 usines de biogaz répertoriés (Scarlat, 2017). Ces exemples européens et asiatiques sont très encourageants pour le continent africain et doivent être pris comme un exemple qu'il faut bien sûr adapté aux contextes et contraintes des pays du grand continent.

II.1.1 Développement progressif de la technologie biogaz à Madagascar

Selon le Ministère malgache de l'Eau de l'Energie et des Hydrocarbures, en 2018, 97% des ménages malgaches utilisaient le bois-énergie comme source principale d'énergie pour la cuisson ; il faut noter que la demande annuelle excède de deux fois la réserve en bois disponible (18 millions de m³ contre 9 millions de m³). Selon une estimation de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), il y aurait à Madagascar plus de 12'000 morts par an (par infections respiratoires aiguës, maladies respiratoires obstructives chroniques, cancer des poumons, etc.) attribuables à la pollution de l'air intérieur causée par la fumée venant de la combustion des combustibles solides.

Il était donc nécessaire, dans le cadre de la nouvelle politique nationale de l'énergie 2015-2030, que les énergies alternatives aux bois-énergies soient mises en avant ; le biogaz en fait partie tout comme l'augmentation de l'utilisation de l'éthanol et des cuiseurs solaires.

Bien que le premier biogaz ait été installé seulement en 1986 à Madagascar, celui-ci connaît depuis quelques années un certain engouement de la part du gouvernement avec le support des organisations internationales et des ONG. En effet, la filière Biogaz sur la Grande Ile est en pleine expansion et dispose d'un fort potentiel à l'avenir surtout au niveau des ménages en milieu rural. Selon l'Institut National des Statistiques de Madagascar, le pays compte en 2018 un cheptel bovin de plus de 10 millions de têtes et d'un cheptel porcin de plus de 1.5 millions de têtes. Une production de 1.5 m³ de biogaz est réalisable avec 3 à 4 zébus malagasy (race locale de vache) ce qui est le minimum nécessaire pour la cuisine journalière d'une famille de 5 personnes. L'élevage en milieu rural étant la principale activité agricole à Madagascar, le biogaz a d'heureux jours devant lui. C'est une des solutions durables pour réduire l'utilisation du charbon de bois et

du bois de chauffe. Depuis quelques années des projets de développement de production de biogaz pour les ménages ruraux augmentent considérablement en exploitant principalement les bouses de bovidés, le purin des espèces porcines et aussi les fientes venant de l'élevage ovins / caprins. Des projets urbains de biogaz ont vu aussi le jour ces dernières années sur la Grande Ile pour la gestion des boues de vidanges venant des fosses septiques des quartiers défavorisés des grandes villes.

Dans le futur, la technologie biogaz devra être adaptée au contexte du pays, être intégrée dans une stratégie nationale plus claire. Un modèle idéal en termes de rapport coût, exploitation, appropriation devra être trouvé.

II.1.2 Type de digesteurs

Il existe deux grandes familles distinctes de biodigester : le biodigester « maçonné » et le biodigester « non-maçonné ». Parmi ces deux grandes familles, on distingue 5 types de biodigesteurs au total. Nous allons les présenter succinctement.

II.1.2.1 Biodigester dit « maçonné »

▪ Biodigester à dôme fixe (type Chinois)

Ce type de biodigester est celui qui a été implanté sur les 2 sites des prisons étudiées et il est très répandu en République de Chine. Cette technique de construction, bien que relativement coûteuse, est réputée pour être durable avec une moyenne de vie de l'ouvrage comprise entre 20 et 50 ans et avec une production de biogaz importante. La construction du dôme du biodigester est conçue soit en brique, soit en béton armé. On préférera une construction enterrée afin d'éviter les fluctuations trop importantes de températures extérieures et protéger ainsi l'ouvrage des intempéries. Important de noter que le biodigester à dôme fixe, qui fonctionne par une alimentation semi-continue, doit être alimenté avec des matières à l'état fluide ; l'ajout d'eau aux matières premières est donc inévitable. Le biodigester à dôme fixe maçonné a un coût de construction élevé et nécessite une technicité de construction importante (participation de maçons qualifiés et de main d'œuvre en nombre important). La vidange du réacteur est difficile.

Il existe aussi le dôme fixe en bache flexible dont la construction en maçonnerie est relativement plus simple. Le coût d'installation est moins élevé, la vidange et l'entretien relativement faciles. Cependant, ce modèle est moins robuste (bache garantie 8 ans) et est soumis aux variations de température et intempéries (bache non protégée).

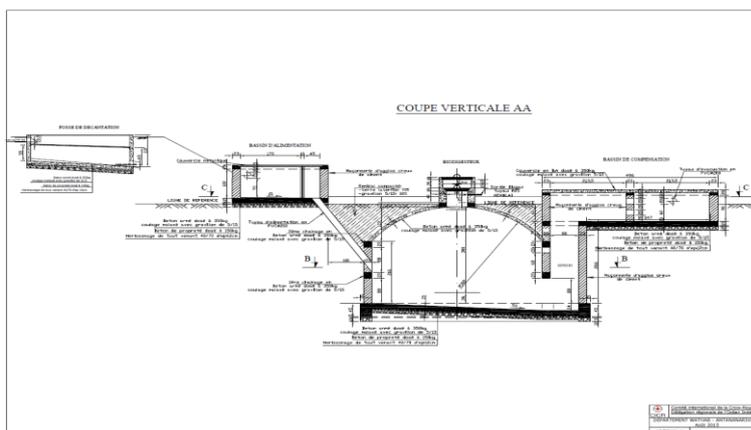


Figure 1 : Coupe verticale d'un biodigesteur à dôme fixe en béton armé (Source : CICR, 2016)

▪ **Biodigesteur à dôme flottant (type Indien)**

Les biodigesteurs à dôme flottant métallique ou en plastique sont construits en maçonnerie classique. Ce modèle a une bonne robustesse avec une durée de vie comprise entre 25 et 35 ans. La vidange et l'entretien sont assez simples. Les performances sont relativement indépendantes des conditions extérieures si enterré. Le coût de ce type de biodigesteur est assez élevé surtout au niveau de la confection du dôme et la technicité de construction peut être une contrainte selon le contexte.



Figure 2 : Digesteur à dôme flottant produisant 4 m³/jour de méthane par déchets organiques biodégradables
Site de production de biogaz du marché de Tuléar, Madagascar avec 3 terminaux : ricecooker, lampe à biogaz, un brûleur simple
(Source : J.Jousselin, CICR, 2018)

II.1.2.2 Biodigesteur dit « non-maçoné »

▪ **Biodigesteur en fibre de verre**

Ce modèle est principalement utilisé en Asie et surtout au Vietnam puisqu'il existe des usines de fabrication locale. Les avantages principaux résident dans la facilité d'installation (kit à assembler), la durée de vie de plus de 10 ans (pour des modèles non maçonés) et la performance. En revanche, sans usine locale, le matériel doit être importé et coûte alors très cher.

▪ Biodigesteur en PVC

Les modèles en PVC peuvent être fabriqués assez simplement mais nécessite l'utilisation de bidon plastique qui peuvent être relativement chers. Bien qu'il puisse être fabriqué de manière relativement simple, son utilisation nécessite des connaissances techniques de la part du ménage. La performance est relativement limitée et dépend assez fortement des conditions extérieures. La durabilité des installations varie en fonction du matériel utilisé et de l'entretien apporté par le ménage.

▪ Biodigesteur dit « flexible »

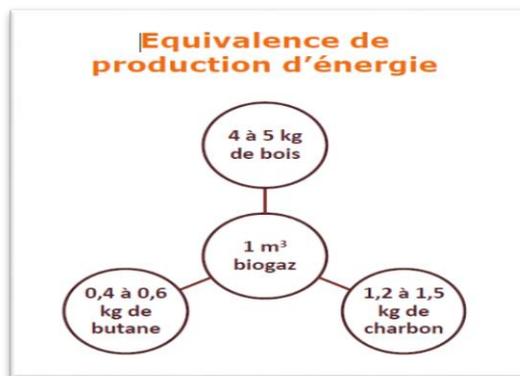
Les modèles flexibles dépendent très fortement de la qualité de la bâche utilisée mais la technologie évoluée et la recherche dans le domaine permet d'avoir des bâches résistantes et spécifiquement conçues pour la méthanisation. Les coûts sont très variables. Ces modèles sont en général très simple d'installation et souvent livré en kit (avec guide d'installation). En revanche, le matériel est entièrement importé et la durabilité reste à tester. La performance est relativement soumise aux conditions extérieures et les installations fortement soumises aux risques liés aux intempéries ou sabotages.



Figure 3 : Biodigesteur non maçonné flexible de 160 m³ à la station de traitement des boues de latrines dans le « bas quartier » défavorisé de Antananarivo, WSUP & CARE (Source : J.Jousselin, CICR, 2018)

A savoir que l'on distingue 2 capacités de biodigesteurs : le digesteur domestique compris entre 2 et 15 m³ et le digesteur communautaire ou productif supérieur à 15 m³. La première catégorie est dédiée aux intrants domestiques qui seront utilisés pour la production de biogaz servant à la cuisson. Ce digestat sera valorisé sur les cultures ou revendu localement. Théoriquement, la deuxième catégorie est dédiée aux intrants urbains (boues de latrines, déchets organiques), industriels (agroalimentaires) et/ou agricoles (résidus) avec une valorisation diversifiée du digestat.

Tableau 1 : Equivalence de production d'énergie pour 1 m³ de biogaz produit (Source : Etc Terra Rongead, 2017)



II.1.3 Principes et conditions de digestion anaérobie

Le système biogaz joue un rôle que l'on peut tout à fait comparer à celui d'une STEP de type micro réseau d'assainissement. La digestion anaérobie est un traitement biologique de matières biodégradables qui se réalise suite à une dégradation et à une fermentation des matières organiques de ce même effluent par des microorganismes anaérobies dans un environnement sans oxygène. Les déchets organiques entrants sont le plus souvent des effluents d'eaux de vannes, des déchets de cuisines biodégradables, du fumier et lisier animal. Cette épuration biologique est réalisée dans un compartiment hermétique sans air que l'on appelle digesteur ou encore méthaniseur. Ce processus de biodigestion par fermentation anaérobie produit 2 éléments essentiels valorisables :

- le gaz combustible communément appelé biogaz composé de méthane (55 à 60% CH₄), de dioxyde de carbone (35 à 40% CO₂), d'ammoniac (NH₃) et de sulfure d'hydrogène (H₂S) en faible quantité. Le méthane est le gaz qui est utilisé comme source d'énergie valorisable et renouvelable.
- le digestat, fraction liquide et solide, est le résidu des matières organiques non dégradées, des matières minérales (azote, phosphore) et de l'eau (H₂O). Le digestat, liquide comme solide, peut être utilisé respectivement sous la forme d'engrais liquide en remplacement des engrais chimiques et sous forme d'engrais solides après séchage pour les sols agraires.

II.2 CICR, précurseur du Biogaz en milieu carcéral en Afrique

Le CICR, fondé en 1863, est une institution internationale suisse indépendante et neutre qui fournit protection et assistance aux victimes de conflits armés et autres situations de violence. Il apporte une aide humanitaire dans les situations d'urgence, et s'emploie également à promouvoir le respect du droit international humanitaire et son intégration dans les législations nationales. Par les Conventions de Genève, le CICR a reçu le mandat de visiter les prisonniers de guerre et les internés civils en période de conflit. En 2018, le CICR a visité plus d'un millions de détenus dans le monde. Les visites du CICR ont pour but de

garantir que les détenus soient traités avec humanité. L'action du CICR en matière d'assistance et de protection aux personnes privées de liberté consiste notamment à aider les autorités à fournir des conditions de détention conformes aux normes internationalement reconnues (CICR, 2019). L'unité Eau et Habitat du CICR, à travers ces projets de construction / réhabilitation des prisons dans le monde, avec un total de 331 projets en 2018 en détention, a su développer une expertise unique dans le domaine de l'ingénierie environnementale des prisons afin d'assurer une bonne gestion des services essentiels tels que l'accès à l'eau potable, les installations sanitaires, les cuisines et les espaces de vie.

C'est dans le cadre de ce travail qu'à partir de 2002 le CICR a réalisé l'implantation de 15 systèmes d'assainissement biogaz dans les prisons du Rwanda (3), du Népal (5), et des Philippines (5) incluant les derniers projets de biogaz à Madagascar (2). L'utilisation de cette technologie de traitement par digestion anaérobie en milieu carcéral s'est avérée être une solution adéquate afin d'améliorer le traitement des boues des latrines et autres eaux usées des prisons, réduisant à la fois les risques pour la santé des détenus et du personnel pénitencier, les risques de maladies, de pollution de l'environnement et diminuant aussi la pollution de l'air intérieur des cuisines par l'utilisation du biogaz à la place du bois-énergie.



Figure 4 : Digesteurs 100 m³ en série – Prison Rwanda (Mottet, 2019)

La demande des autorités pénitentiaires pour l'installation biogaz est de plus en plus importante en milieu carcéral sur le continent africain avec des nouveaux projets pour le futur (Sénégal, Burundi...). Le développement, à plus grande échelle de cette technologie de traitement efficace des eaux usées et écologique par bio-digestion dans la filière assainissement, amène le CICR à être intéressé par de nouvelles recherches. Celles-ci vont, à l'avenir, contribuer à des connaissances encore plus poussées sur la situation du système biogaz communautaire applicable en milieu carcéral.

II.3 Biogaz dans les prisons à Madagascar

Le Comité international de la Croix-Rouge (CICR) a ouvert une mission pour Madagascar en 2002 à Antananarivo. C'est devenu en 2011 une Délégation régionale pour l'Océan Indien couvrant également l'Union des Comores, l'île Maurice et les Seychelles. L'Accord de Visite signé avec la République de

Madagascar en 2002 et avec l'Union des Comores en 2014 formalise les activités humanitaires du CICR en faveur des personnes privées de liberté dans les lieux de détention de ces deux pays. En conformité avec son mandat, le CICR collabore étroitement avec les maisons de détention à Madagascar dans le but d'améliorer les infrastructures et l'hygiène des détenus. La population carcérale totale à Madagascar est d'environ 23'800 détenus en 2018 répartis dans 43 MC sur l'ensemble du territoire.

En raison des infrastructures vétustes et inadaptées à la surpopulation carcérale, les problèmes de surutilisation des ouvrages d'assainissement et les problèmes de manque d'accès à l'eau et aux latrines pour les détenus sont récurrents. Dans le cadre d'un programme nutritionnel d'envergure supporté par le CICR (plus de 1'770 détenus traités chaque mois dans 18 prisons en 2016), le département Eau & Habitat est intervenu par la réhabilitation/ construction des ouvrages de la chaîne alimentaire carcérale notamment par la construction de 2 systèmes d'assainissement biogaz ; initiative totalement inédite pour le pays.

Dans ce contexte carcéral malgache, la mise en place d'un tel système d'assainissement biogaz communautaire est très pertinent de par un traitement efficace des eaux usées conduisant à une amélioration sanitaire des prisons et de par la production de biogaz utilisée comme source d'énergie renouvelable réduisant la consommation de bois de chauffe et la pollution de l'air intérieur des cuisines. Ce système a un impact positif sur l'environnement. L'utilisation de l'effluent sortant (eaux usées traitées) comme engrais et/ou compost est aussi une autre source potentielle de valeur ajoutée à ce système.

Le CICR a accompagné deux prisons de la région d'Antananarivo pour mettre en place un tel système de traitement par digestion anaérobie des boues de latrines des prisons afin de remplacer les fosses septiques. Un premier biodigester de 50 m³ a été réalisée et inaugurée en juin 2016 et un second de 30 m³ a été finalisé fin 2016. Le modèle choisi est un biodigester enterré maçonné à dôme fixe en béton armé. Les biodigesteurs sont autonomes et se remplissent sans manutention via la connexion directe aux latrines de la prison. Le projet, entièrement financé par le CICR, a permis aux prisons bénéficiaires d'avoir un système d'assainissement plus approprié et plus simple d'utilisation (moins de maintenance et vidange) ainsi qu'un système de cuisson plus propre et moins coûteux que le bois-énergie utilisé jusqu'alors. Par contre, fort est de constater que le digestat (eaux usées traitées) est rejeté sans valorisation.

III. Objectifs de l'étude et hypothèse de travail

Après plus de deux ans d'opérationnalité de deux biodigesteurs communautaires dans 2 MC à Madagascar, cette étude a pour objectif principal de proposer des solutions durables, adaptées et pratiques aux moyens de gestion des centres pénitenciers. Elle déterminera pour les ingénieurs et techniciens en charge de ce type de système d'assainissement une exploitation plus optimale de ces deux biodigesteurs productifs en milieu

carcéral. Ce diagnostic pourra servir de référence technique à une meilleure exploitation et maintenance des biogaz déjà installés dans des prisons ou en cours de construction ou bien même en phase d'avant-projet détaillé d'implémentation de biogaz dans des pays en voie de développement.

A savoir que trois principales observations ont été faites et qu'elles ont finalement amené notre équipe d'ingénieurs à établir le bilan suivant:

a°) Une production anormalement faible de méthane a été constatée au niveau des deux biodigesteurs ce qui ne permet pas de produire suffisamment de biogaz pour les besoins de cuisson des deux établissements. Ce manque de production est un signe potentiel de disfonctionnement des digesteurs ce qui peut remettre en question leur efficacité en terme d'assainissement.

b°) Les eaux traitées (digestat) sont rejetées et alimentent directement des parcelles rizicoles et maraichères voisines en aval des deux systèmes biogaz. Aucune valorisation du digestat n'est concrètement effectuée.

c°) L'absence d'un plan clair et formel de maintenance et des tâches régulières de maintenance sur les deux biogaz. De plus, aucune formation approfondie d'exploitation n'a été dispensée dans le passé aux gestionnaires de prison ainsi qu'aux agents et détenus censés être en charge de l'entretien du biodigesteur, canalisations d'amené, dégrilleur...

Suite à ces trois principales observations faites sur site dans les 2 prisons respectives, le diagnostic formulé est le suivant :

- ✓ maintenir une production de biogaz constante et optimale des deux biodigesteurs ;
- ✓ fournir un système de valorisation du digestat adapté aux contraintes locales et respectant l'environnement ;
- ✓ fournir un transfert de compétence en termes d'O&M aux exploitants des deux biodigesteurs pour une durabilité des deux projets biogaz en milieu carcéral.

Il est important de vérifier les observations décrites ci-dessus par un diagnostic plus poussé sur le terrain avec des données collectées vérifiables et en apportant par la suite des solutions concrètes sur les deux sites d'exploitation de biogaz.

Pour ce diagnostic, le CICR a utilisé le support d'un consultant en commanditant une étude technique sur le fonctionnement de ces digesteurs. Cette étude pour les deux prisons étudiées présente un état des lieux du fonctionnement du digesteur en regardant le contexte d'exploitation, l'utilisation, les caractéristiques biologiques et physico-chimique du digesteur en effectuant des mesures et prélèvements sur les deux biodigesteurs. Ensuite, des solutions ont été proposées, testées, suivies par les ingénieurs du CICR et l'entreprise consultante ARAFA pour améliorer le fonctionnement du digesteur et le traitement des effluents. Le diagnostic terrain ainsi que la mise en œuvre des solutions ont été réalisés en étroite collaboration avec les ingénieurs du CICR et avec l'ingénieur du SNHCD (Ministère de la Justice) en charge de l'exploitation et de la maintenance des biogaz en milieu carcéral. Le projet de diagnostic s'est déroulé sur 14 semaines d'avril 2018 à juillet 2018 et le suivi régulier jusqu'à mi-octobre 2018.

IV. Matériels & méthodes

IV.1 Diagnostic du système biogaz à la MF de Tsiafahy

IV.1.1 Description du système

En juin 2016, le Ministère de la Justice malgache et le Comité international de la Croix-Rouge (CICR) ont inauguré la mise en service du système de production de biogaz dans la prison de haute sécurité de Tsiafahy où la population carcérale interne s'élève en Février 2019 à 1'017 détenus. Comme dans beaucoup d'autres établissements pénitentiaires, cette prison était confrontée à des problèmes majeurs d'assainissement mais également d'alimentation en énergie pour la cuisson des aliments. L'installation d'un système biogaz a pu remédier à ces problèmes. C'est en 2014, à la demande de l'Administration Pénitentiaire que le CICR par le biais de son département Eau et Habitat, a souhaité lancer ce projet de production de biogaz. La Maison de Force de Tsiafahy, prison de haute sécurité, a été choisie pour servir de site pilote d'implantation de ce projet de production de biogaz. En février et avril 2015, un avant-projet sommaire puis une étude d'avant-projet détaillée réalisée par le très sérieux bureau d'étude malgache Core-Dev a été établi sur la faisabilité d'un tel projet dans l'objectif de sa concrétisation. Cet avant-projet a examiné la possibilité de transformation des excréments des détenus de la Maison de Force de Tsiafahy en biogaz par le biais de la technologie de la biométhanisation. Dans ce cas, le digesteur est directement relié aux latrines. La quantité de matière organique entrant dans le digesteur est calculée en fonction du nombre de détenus, du temps moyen de rétention dans le digesteur et du type de chargement utilisé (par gravité, ou manuellement). Dans l'avant-projet, le choix du procédé de digestion anaérobie s'est porté sur un digesteur semi-continu. Le temps de séjour dans le digesteur ou TRH est de 30 jours avec une température moyenne de 20°C.

La population carcérale de Tsiafahy était estimée à l'époque à 815 personnes. Pour l'étude de Core-Dev, le volume journalier de fèces ayant été considéré par individu est de 0,3 kg incluant les urines. Le rapport

carbone/azote (C/N) est un paramètre très important sachant qu'il doit se maintenir au niveau optimum de 30/1. Ici ce rapport était de 7,91. Si le rapport C/N devient élevé, la production de biogaz diminue à cause du manque de nitrogène. Dès cette étude, il était clair que pour ajuster ce ratio C/N, il faudrait ajouter des matières organiques comme la paille de riz, l'ensilage de maïs, les herbes, déchets de légumes ou de fruits, les déjections animales et les déchets agroalimentaires (huiles, graisses). A savoir que les matières organiques ligneuses issues de la filière bois (branchage, copeaux, sciure...) ne peuvent pas être digérées par les bactéries et ne doivent pas être utilisées.

Ce type de biodigesteur à alimentation semi-continue doit être alimenté avec des matières à l'état fluide, l'ajout d'eau aux matières premières est inévitable. Cette opération ne pose cependant pas de problème car la MF est alimentée en continu par le captage d'une eau de source réalisée par le CICR en 2011. Selon cette étude, la production de gaz journalière pourrait atteindre au total de 20 m³ par jour.

Les composantes principales du système sont :

- substrats issus des latrines (fèces des détenus...)
- stock de matières organiques d'appoint (principalement : pailles de riz broyées)
- source d'eau permanente (quantité requise : environ 250 litres / jour)
- diverses canalisations (transport des substrats vers le digesteur et évacuation des digestats)
- biodigesteur à dôme fixe (50 m³)
- diverses tuyauteries pour l'utilisation du biogaz
- appareils d'utilisation du biogaz (fours munis de brûleurs biogaz)
- stockage éventuel des effluents (digestats)
- utilisation des digestats



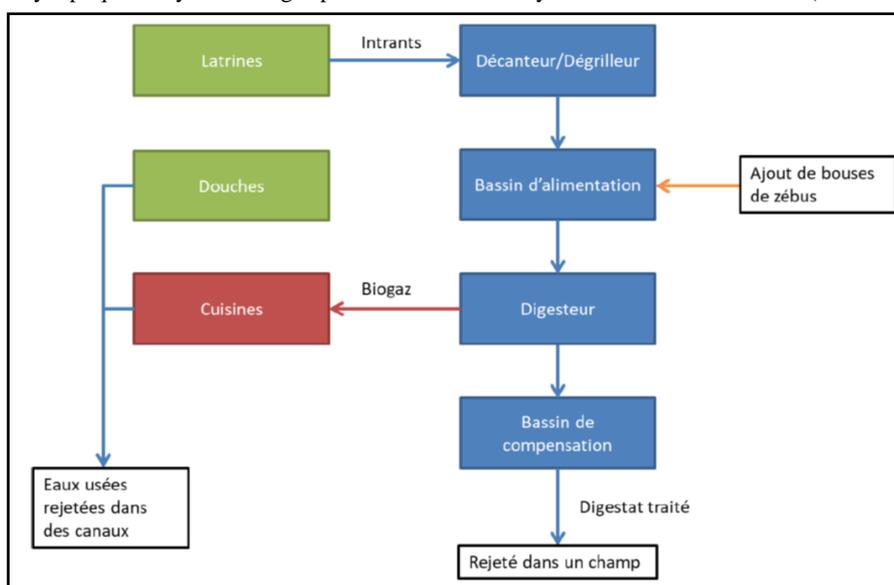
Figure 5: Vue du biodigesteur à la MF de Tsiafahy (Source: J.Jousselin, CICR, 2017)

Le digesteur est situé à l’extérieur de la prison derrière le mur extérieur de sécurité. Il est enterré et seul le haut du dôme sort de terre. Le digesteur à dôme fixe se trouve sous la partie 2 de la photo ci-dessus sous le niveau du sol. Lors de la production de gaz, la pression augmente dans le digesteur, poussant ainsi le liquide vers la sortie, dans le bac de sortie. C’est cette pression du gaz et la variation du niveau de liquide dans le digesteur qui produit le stockage de gaz dans le système : c’est pour cela qu’il est nécessaire de l’utiliser au cours de la journée.

Le système complet est composé d’un premier bassin de décantation incluant en entrée le dégrilleur, puis d’un bassin d’alimentation (n°1 sur figure 5) que l’on voit apparaître en haut à droite sur la photo. Ce dernier sert à introduire directement des déchets organiques extérieurs et fait aussi office de bassin tampon, mais il n’est plus utilisé depuis 2016 date à laquelle les dernières bouses de zébu ont été ajoutées. Ensuite, vient le digesteur (2) qui est complété par un bassin de compensation (3) que l’on voit en premier plan sur la photo. Comme le gaz est stocké sous pression, lorsque cette même pression augmente dans le digesteur (2), le niveau dans le bassin de compensation (3) augmente et le digestat est rejeté naturellement au niveau d’un chemin situé en contrebas du système. Les effluents rejetés s’écoulent ensuite au travers d’un champ cultivé.

Les eaux usées collectées par le système de traitement proviennent exclusivement des latrines de la prison. Les eaux de douches et de cuisine sont rejetées dans de petits canaux et n’alimentent pas le système. Le gaz produit est directement utilisé dans les cuisines de la prison via trois brûleurs à gaz. Deux manomètres sont présents sur le circuit, le premier situé juste à la sortie du digesteur est fonctionnel et le second situé à l’entrée de la cuisine ne fonctionne plus. La production actuelle de gaz permet de faire fonctionner un seul des trois brûleurs pour une durée d’environ 1h20mn. Parmi ces 3 brûleurs, seul celui du milieu est fonctionnel. Le premier ne s’allume pas du tout alors que le troisième s’éteint après une minute d’allumage.

Tableau 2 : Synoptique du système biogaz pour la MF de Tsiafahy et la MC de Maevatanana (Source : CICR, 2018)



IV.1.2 Contrôles et mesures réalisés

IV.1.2.1 Contrôle physique des ouvrages

Un contrôle visuel sur l'ensemble du système a été réalisé notamment sur les regards au niveau du système d'évacuation des effluents entre les latrines et le biodigester. Un autre contrôle particulier a été réalisé au niveau du décanteur primaire (où se situe le système de dégrilleur), au niveau du bassin d'alimentation et sur la zone de sortie des effluents digérés.

IV.1.2.2 Installation d'équipements de mesures

Afin de réaliser des mesures sur le volume de gaz produit par jour, l'installation d'un compteur volumétrique a été nécessaire. Le compteur a été installé le 16 avril 2018 à l'entrée de la cuisine à la place du manomètre qui ne fonctionnait plus. Le 25 avril 2018, un manomètre a été installé à l'entrée des cuisines afin de s'assurer que la totalité du gaz est consommée chaque jour.

IV.1.2.3 Calcul de débit des effluents entrants

Une mesure de débit des effluents entrants a été réalisée. Pour ce faire, la conduite d'amené des effluents a été bouché au niveau du bassin tampon. Au bout de 24 heures, une mesure du niveau d'eau dans le bassin a été réalisée afin de déterminer le volume écoulé pendant 24 heures.

IV.1.2.4 Tests directs sur site

Deux principales mesures sur sites ont été réalisées : la détermination du pH des effluents entrants et sortants du système biogaz et la détermination de la composition du gaz.

Pour la détermination du pH, ont été utilisées des lamelles à pH qui permettent de déterminer le pH par colorimétrie. Pour la détermination de la composition du gaz, une seringue pouvant contenir jusqu'à 100 ml de liquide ou de gaz a été utilisée, 50 ml de biogaz ont été prélevés, auxquels ont été ajoutés 10 ml de soude. En se mélangeant au contenu de la seringue, la soude a permis d'éliminer le dioxyde de carbone présent dans le biogaz afin qu'il ne reste plus que le méthane à l'état gazeux, de la soude liquide et du vide. Le vide est ensuite comblé grâce à de l'eau et la quantité non liquide restante dans la seringue représente la teneur en méthane du biogaz sur les 50 ml initialement prélevés. Chacune des opérations de remplissage de la seringue a été réalisée de manière à ce que le contenu de la seringue ne puisse pas s'échapper.

IV.1.2.5 Prélèvements pour analyses

L'effluent a été prélevé lors de la première visite en entrée au niveau d'un regard situé à l'intérieur de la prison et au niveau de la conduite de sortie du digesteur. Un second prélèvement a été réalisé lors d'une troisième visite au niveau du bassin d'alimentation, plus proche de l'entrée du digesteur. Des analyses au LRI d'Antananarivo (Laboratoire des Radio Isotopes) ont été réalisées sur ces effluents afin de déterminer leur teneur en MES et MVS. D'autres analyses ont été réalisées par le CNRIT (Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques) pour déterminer la DCO de ces échantillons.

IV.2 Diagnostic du système biogaz à la MC de Maevatanana

IV.2.1 Description du système

Le biodigesteur de 30 m³ à la MC de Maevatanana à quant à lui été inauguré en fin 2016. C'est le deuxième projet de production de biogaz installé par le CICR via une entreprise de construction locale. Cette prison compte désormais 336 personnes détenues. Le biodigesteur de cette prison est théoriquement autonome et se remplit sans manutention via la connexion directe aux latrines. Ce projet, entièrement financé par le CICR tout comme à la MF de Tsiafahy, permet d'avoir un système d'assainissement plus approprié et plus simple d'utilisation (moins de maintenance et de vidanges) ainsi qu'un système de cuisson plus propre et moins coûteux que le bois-énergie utilisé. A savoir que le digestat est rejeté sans valorisation avant ce diagnostic. La production de gaz journalière estimée est d'au moins 10 m³ par jour.

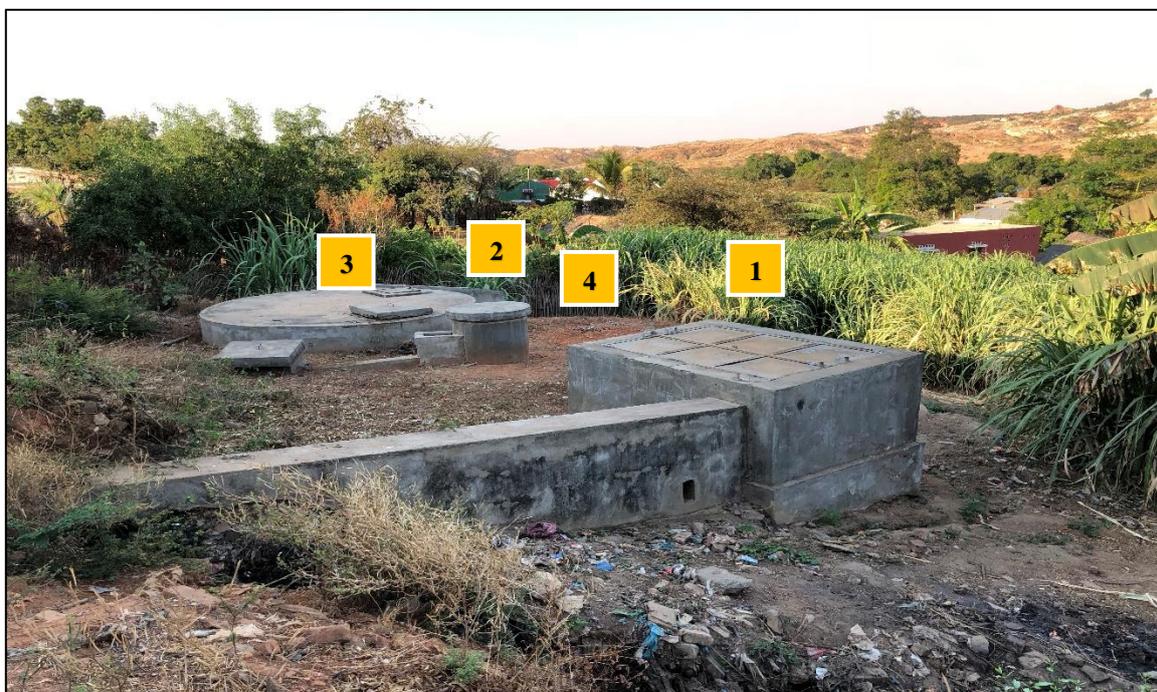


Figure 6: Vue du biodigesteur à la MC de Maevatanana (Source: J.Jousselin, CICR, 2018)

Le digesteur étudié est situé à l'extérieur de la prison. Ce dernier est enterré et seul le haut du dôme sort de terre et est apparent. Il s'agit d'un modèle de digesteur à dôme fixe. Lors de la production de gaz, la pression

augmente dans le digesteur, poussant ainsi le liquide vers la sortie, dans le bac de sortie. C'est cette pression du gaz et la variation du niveau de liquide dans le digesteur qui produit le stockage de gaz nécessaire à son utilisation au cours de la journée. Le système complet est composé d'un premier bassin de décantation servant notamment au dégrillage. A l'aval se trouve le bassin d'alimentation (1). Ce dernier sert à introduire directement des déchets organiques extérieurs. Ensuite, vient le digesteur (2) qui est complété par un bassin de compensation (3). Comme le gaz est stocké sous pression, lorsque celle-ci augmente dans le digesteur (2), le niveau dans le bassin de compensation (3) augmente et le digestat est rejeté dans un bassin (4) situé en contrebas du système. Les effluents rejetés s'écoulent ensuite au travers d'un champ cultivé.

Les eaux usées collectées par le système de traitement proviennent exclusivement des latrines de la prison. Les eaux des douches et de cuisine sont rejetées dans de petits canaux et n'alimentent pas le système, elles se déversent ensuite directement dans les parcelles derrière la prison.

Le gaz produit est directement utilisé dans les cuisines de la prison via 2 brûleurs à gaz. Un manomètre est présent sur le circuit et est situé à la cuisine entre les 2 vannes de gaz. La production actuelle de gaz permet de faire fonctionner un seul des deux brûleurs pour une durée de 15 mn ce qui a été confirmé après les essais effectués durant l'étude. Les 2 brûleurs ne représentent aucun dysfonctionnement mais un seul est utilisé en raison de la très faible quantité de gaz disponible. Les vannes de chaque brûleur sont scellées ce qui rend la maintenance très compliquée en cas de dysfonctionnement de celles-ci. De plus, ces brûleurs sont des brûleurs au bois de chauffage qui ont été modifiés pour le biogaz.

IV.2.2 Contrôles et mesures réalisés

IV.2.2.1 Contrôle physique des ouvrages

Tout comme à la MF de Tsiafahy, un contrôle visuel sur l'ensemble du système a été réalisé notamment sur les regards au niveau du système d'évacuation des effluents entre les latrines et le biodigesteur. Un contrôle particulier a été réalisé au niveau du décanteur primaire (où se situe le système de dégrilleur), au niveau du bassin d'alimentation et sur la zone de sortie des effluents digérés.

IV.2.2.2 Installation d'équipements de mesures

Lors de la visite du 04 juin 2018 à la maison centrale de Maevatanana, il a été constaté que le manomètre installé ne peut mesurer que 50 mbar soit 5 KPa au maximum de pression. Or d'après les calculs et selon la forme du digesteur, la production peut s'élever jusqu'à 1.6 m d'eau de pression, soit 16 KPa. Afin de pouvoir mieux étudier le comportement du digesteur et mesurer de façon plus précise la pression produite, le manomètre a été remplacé par un manomètre pouvant atteindre 16KPa. Un compteur volumétrique a été installé le même jour.

IV.2.2.3 Calcul de débit des effluents entrants

Une mesure de débit des effluents entrants a été réalisée. Pour ce faire, la conduite d'amenée des effluents a été bouchée au niveau du bassin tampon. Au bout de 24 heures, une mesure du niveau d'eau dans le bassin a été réalisée afin de déterminer le volume écoulé pendant 24 heures.

IV.2.2.4 Tests directs sur site

Deux principales mesures sur sites ont été réalisées : la détermination du pH des effluents entrants et sortants du système biogaz et la détermination de la composition du gaz. Les techniques de tests sont les mêmes qu'à la MC de Tsiafahy.

IV.2.2.5 Prélèvements pour analyses

Des échantillons des effluents entrants du bassin d'alimentation et sortants du bassin de compensation ont été prélevés et analysés au LRI d'Antananarivo (Laboratoire des Radio Isotopes) pour déterminer leur teneur en MES et MVS. Deux analyses ont été réalisées pour chaque effluent afin de comparer les valeurs obtenues. D'autres analyses ont été réalisées par le CNRIT (Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques) pour déterminer la DCO de ces échantillons.

IV.3.3 Etude environnementale

Un diagnostic des potentiels impacts de l'exploitation du biodigesteur sur l'environnement à la MC de Maevatanana a été réalisé. Cette étude a eu pour objectif d'identifier les enjeux environnementaux et de proposer des solutions face à la situation.

Cette étude d'impact a suivi les étapes suivantes :

- ✓ Etat du site et de son environnement : les différentes thématiques de l'environnement sont étudiées (milieu physique, milieu naturel et milieu humain).
- ✓ Analyse des impacts du projet sur l'environnement : les impacts du projet sur l'environnement sont déterminés en fonction des caractéristiques propres au projet. Ces impacts sont qualifiés (positifs ou négatifs) ; leur intensité est donnée (négligeable, faible, moyen, fort) et ils sont jugés notables (impacts devant faire l'objet de la mise en place d'une mesure) ou acceptables (impacts négligeables).
- ✓ Description des mesures associées : pour les impacts jugés notables, des solutions viables aux enjeux environnementaux sont proposées.

Le cadre législatif applicable à ce projet est résumé comme suit :

- ✓ Charte de l'environnement : la loi n°90.033 du 21 décembre 1990 modifiée et complétée par les lois 97.012, 2004/015 et 2005/003 portant Charte de l'Environnement Malagasy définit la Politique Environnementale actuelle de Madagascar qui vise à réconcilier l'Homme avec son Environnement. Elle précise dans son article 10 que tout investissement public ou privé susceptible de porter atteinte à la qualité de l'Environnement doit faire l'objet d'une étude d'impact. Cet article de la Charte de l'Environnement a été repris et détaillé par le décret MECIE et les réglementations sectorielles.
- ✓ Code de l'eau : la loi n°98.029 du 19 décembre 1998 portant code de l'eau définit la domanialité publique de l'eau, la conservation et la mise en valeur des ressources en eau. Sur la pollution des eaux, elle prévoit, entre autres que les eaux usées doivent faire l'objet d'un traitement approprié avant d'être rejetées dans le milieu naturel et institue le principe « Pollueur-Payeur » pour renforcer la lutte contre la pollution des eaux, en particulier en son article 12.

Cette étude a aussi inclus une enquête de proximité des ménages vivant aux alentours du biodigesteur de la prison menée par un chargé d'enquête afin de récolter le maximum d'informations concernant les potentielles nuisances que subit le voisinage.



Figure 7: Zone d'étude et milieu naturel de la MC de Maevatanana (Source : CICR, 2018)

V. Résultats & discussion

Les parties V.1 et V.2 de ce rapport traitent des résultats et des solutions mises en place dans les deux prisons étudiées. Ces sections vont décrire précisément l'identification des dysfonctionnements notés lors de l'exploitation des systèmes biogaz par une interprétation des données récoltées.

Nous aborderons aussi les solutions d'amélioration des systèmes qui ont été mises en place à court terme afin de remédier rapidement et efficacement à ces dysfonctionnements. Une analyse critique de l'étude et des solutions mises en œuvre sera aussi faite dans cette partie.

V.1 Résultats & solutions mises en place à la MF de Tsiafahy

V.1.1 Une amélioration O&M indispensable

Lors du contrôle physique du fonctionnement des ouvrages, le décanteur primaire situé à l'entrée du système a été ouvert. Il a alors été observé que le dégrilleur était complètement obstrué par des déchets solides et des fèces. Une grande partie des matières organiques exploitables par le système et présentes dans les effluents entrant est retenue par le dégrilleur et n'arrive au digesteur qu'une fois par semaine lorsque le dégrilleur est nettoyé (tous les lundis) alors qu'il est nécessaire de l'alimenter quotidiennement. La fréquence de nettoyage du dégrilleur doit être augmentée afin d'optimiser le rendement du système. Il a également été observé des morceaux de plastiques et autres déchets non organiques retenus par le dégrilleur. Ces déchets passent à travers les mailles lorsque ce dernier est nettoyé et se retrouvent donc dans le digesteur. Un piège à eau est ouvert une fois par semaine afin d'éliminer l'eau du gaz en évacuant l'eau du gaz récupérée au fond de la conduite. Aucun désulfurisateur n'est installé sur la conduite.

Suite à ces constats, les solutions concrètes ayant été mises en place sont les suivantes :

- L'amélioration de l'O&M passant forcément par un renforcement des capacités du personnel exploitant, **un manuel d'utilisation et de maintenance spécifique aux deux prisons étudiées (voir Annexe 1) a été élaboré** et une **formation intensive de deux jours a été dispensée** sur site. Le but de la formation était de sensibiliser l'utilisateur aux bienfaits de l'utilisation du biogaz et de les former aux principes de fonctionnement et d'entretien du biodigesteur. La formation s'est basée sur le manuel d'utilisation du biogaz élaboré lors de ce diagnostic. Cette formation s'est déroulée le 02 et 03 Août 2018 à la MF de Tsiafahy. La première journée consistait à la formation théorique des gestionnaires de la Maison de Force. Le jour suivant a été consacré à la formation pratique des responsables de maintenance sur les principaux éléments suivant :
 - Formation sur le principe de fonctionnement du biogaz et présentation du biogaz
 - Simulation de l'utilisation du pulvérisateur à eau pour l'entretien du dégrilleur

- Simulation à la manipulation des vannes du système de conduites
- Instruction sur la prise et relevé des notes quotidiennes sur le niveau de pression ainsi que le volume de gaz utilisé par jour
- Simulation de la recherche des fuites et manipulation du piège à eau et du désulfurisateur
- Simulation de l'entretien des brûleurs
- Triage des déchets bio organiques
- Utilisation des broyeurs manuels pour l'ajout de déchets organiques et exercice de renflouement du biodigesteur au niveau du bac d'alimentation

Des affiches explicatives du fonctionnement du biodigesteur et de bonnes pratiques ont été aussi posées sur les murs de la cuisine et dans les quartiers des détenus. Au total, 10 personnes ont été formées par les ingénieurs du CICR et les techniciens d'ARAFa incluant la Directrice Provinciale de l'Administration Pénitentiaire, le Directeur de la MF de Tsiafahy, le Surveillant Général de la MF, le magasinier de la MF et 5 détenus en charge de la maintenance des cuisines et du biodigesteur.



Figure 8: Module de formation sur le fonctionnement du biodigesteur
Incluant des stagiaires Agents Pénitenciers et détenus en charge de la maintenance (Source : CICR, 2018)

- Installation d'un désulfurisateur permettant d'éliminer le soufre présent dans le biogaz afin de supprimer toutes les mauvaises odeurs et de protéger de la corrosion les parties métalliques des brûleurs (augmentation de la durée de vie de ces brûleurs). Une vanne de dépannage a été aussi installée avec succès. Il s'agit ici des mesures qui ne permettront pas d'améliorer directement la production de biogaz mais qui faciliteront l'exploitation du système.

V.1.2 Une production de gaz à améliorer

Après l'installation du compteur volumétrique et du manomètre, des visites à la prison ont permis de relever de nouvelles données. Les volumes mesurés sur le compteur à biogaz sont annexés à ce rapport dans l'annexe 2. La consommation moyenne journalière de gaz est de 2,94 m³/j avec 5 valeurs comprises entre

2,41 et 3,11 m³/jour et un pic à 4,03 m³/jour sur la période du 16 avril au 22 avril 2018. Toutefois, cette consommation ne saurait être entièrement liée à la production car il a été observé que les cuissons sont souvent stoppées avant que le digesteur ne soit vide de son gaz. Il reste souvent de la pression dans le digesteur. Il est recommandé de consommer tout le biogaz chaque jour et de noter à chaque utilisation la pression de fin de cuisson afin de mieux cerner le comportement d'utilisation du digesteur. Les analyses en laboratoire ont montré que la quantité de MVS dans l'échantillon d'entrée de la MF de Tsiafahy est de 13,66 kg/jour et à la sortie est de 3,91kg/jour ; la quantité MVS transformée est donc (entrée - sortie) 9,75 kg/jour. Le potentiel moyen théorique de biogaz de MVS pour l'excréta humain suivant un régime alimentaire normal est de 0,6 m³/kg ainsi normalement le volume de gaz obtenu pour 9,75 kg/jour est 9,75 kg x 0,6 m³/kg = 5,85m³. Par contre notre production moyenne par jour est de 2.94 m³ par jour ce qui est bien en-dessous de la production de gaz théorique calculée.

On peut expliquer cette différence de moitié entre la quantité de biogaz produite et la quantité théorique par un régime des détenus étant particulièrement pauvre avec 300 grammes en moyenne de manioc par jour sur une base mono-alimentaire. Par conséquent, le potentiel méthanogène de la MVS présente est faible.

V.1.3 Une charge organique trop faible des effluents entrants

Le calcul de débit des effluents entrants a été basé sur l'observation du remplissage du bassin d'alimentation du système biogaz qui se remplit au bout de 27 heures. Les dimensions intérieures de ce bassin étant les suivantes : 2,25m x 1,15m x 1,1m = 2,85 m³ ; on en déduit le débit horaire de 0,11 m³/heure environ et un débit journalier de 2,5 m³/jour. Grâce à ce débit, les deux paramètres essentiels au bon fonctionnement d'un digesteur peuvent être déterminés :

- Le TRH est de 20 jours avec un débit entrant de 2,5 m³/jour et un volume du digesteur de 50 m³. Pour un climat comme celui de la MF de Tsiafahy, le temps de rétention optimal serait de 30 jours mais nous pouvons considérer qu'en 20 jours la dégradation des composés organiques peut avoir lieu pour une production de biogaz satisfaisante.
- La charge organique par mètre cube de digesteur est déterminée à partir des analyses qui ont été réalisées en laboratoire sur les échantillons entrants prélevés au niveau du bassin d'alimentation et du débit. On obtient une charge solide de 0,37 kg/jr/m³ du digesteur à partir des concentrations en MES. C'est la MVS qui représente la part organique des solides présents dans le digesteur. Parmi les MES, on trouve 75% de MVS, ce qui donne une charge organique de 0,28 kg/m³/jr. Cette charge devrait être comprise entre 1 et 3 pour un fonctionnement optimal du digesteur. Cette notion de charge organique correspond à la quantité de « nourriture » avec lequel le digesteur est nourri. Cette

charge trop faible est très révélatrice du problème rencontré, en indiquant clairement, que l'on nourrit le digesteur avec suffisamment de volume mais pas avec suffisamment de matière à consommer par les bactéries pour produire du biogaz.

V.1.4 Une composition de gaz optimale

Le pH, mesuré à deux reprises avec les échantillons prélevés, est compris entre 8 et 9. Le pH attendu pour un digesteur de ce type doit être compris entre 7 et 9. Il n'y a donc ici aucune acidification du digesteur et le pH des effluents est convenable pour un bon fonctionnement du système.

Concernant les tests de composition de gaz, les résultats sont les suivants :

- **Test 1** : Il restait dans la seringue 38 ml de gaz sur les 50 initialement prélevés soit une teneur en méthane de 76%
- **Test 2** : Il restait dans la seringue 40 ml de gaz sur les 50 initialement prélevés soit une teneur en méthane de 80%

Ces tests démontrent donc que le biogaz est de bonne qualité avec une teneur en méthane excédent les 70% qui est la limite minimale pour une bonne composition.

V.1.5 Des analyses révélatrices de dysfonctionnements

V.1.5.1 Matière organique à taux trop faible

Les résultats des analyses effectuées en laboratoires sur les effluents entrants et sortants du système biogaz sont les suivants:

Tableau 3: Résultats des analyses en laboratoires de l'effluent (Source : CICR)

| Paramètres analysés | Echantillon n*1 Effluent | Echantillon n*2 Effluent | Echantillon n*3 Effluent |
|---------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|
| | Entrée 1 Regard | Entrée 2 Bassin Alimentation | Sortie Biodigesteur |
| MES % | 0.5 | 0.75 | 0.39 |
| MES mg/L | 4970 | 7385 | 3555 |
| MVS % de MES | 63 | 74 | 44 |
| MVS mg/L de MES | 3131 | 5465 | 1564 |
| DCO mg/L | 4930 | ▪ | 3650 |

Ces analyses ont permis de mettre en évidence la nature du problème. En effet, la teneur en MES de 0,5% des effluents entrants est bien trop faible pour permettre une grande production de biogaz. Les effluents sont trop pauvres en matières organiques digérables par le système pour produire du biogaz. Ce problème

provient essentiellement de l'alimentation des détenus qui ne consomment que du manioc en quantité rationnée avec une moyenne de seulement 300 grammes de manioc par jour et par détenu.

On observe un abattement sur les trois paramètres MES, MVS et DCO qui nous indique que le traitement dans le digesteur permet de réduire la pollution des effluents. Pour les analyses de MES de l'intrant, nous retiendrons celles réalisées sur le prélèvement fait au niveau du bassin d'alimentation qui est plus représentatif de l'effluent dans le digesteur. L'abattement de la MVS est de l'ordre de 70% ce qui prouve que le digesteur fonctionne assez bien.

Suite à ce constat, il était absolument primordial de mettre en place un système d'optimisation de la production de biogaz par une augmentation régulière de la quantité de matière digérable en entrée du digesteur à travers l'apport de déchets organiques broyés. Cet ajout de déchets organiques a été mis en place suite à cette étude. Les seuls déchets organiques disponibles et gratuits sont les déchets alimentaires des détenus qui sont entassés dans 3 bidons en plastique qui contiennent respectivement 30 kg de déchets chacun. Il s'agit essentiellement de pelures et de poudre de manioc avec une quantité certes limitée d'épluchures de légumes et de fruits reçus une fois par semaine par certains détenus qui sont visités par leur famille. L'objectif est d'atteindre une charge organique par m³ de digesteur de 1,5 kg/jr/m³ sachant que l'on sait qu'actuellement la charge est de 0,28 kg/jr/m³. Il faut donc l'augmenter de 1,22 kg/jr/m³ ce qui correspond à une augmentation de 61 kg/jr de charge organique pour tout le volume du digesteur.

On considère que sur des déchets organiques solides, 60% de leur poids correspond à de la matière organique biodégradable et donc exploitable par le digesteur. Pour atteindre les 61 kg de charge organique supplémentaire, il faudra donc ajouter quotidiennement dans le bassin d'alimentation 101 kg de déchets organiques. Le volume de déchets disponible par jour est de 90 kg. C'est donc dans ce contexte, qu'ont été fournis deux broyeurs alimentaires manuels (type broyeur de boucher) aux détenus qui se relaient dans la journée pour broyer ces déchets avant de les introduire dans le bassin d'alimentation. La productivité attendue en utilisant ce broyeur manuel est d'environ 5kg/heure. Néanmoins il est possible de faire tremper dans l'eau pendant quelques jours la matière entrante afin de faciliter le broyage.

Grâce à cette solution, il est possible d'augmenter la charge organique du digesteur à 1,35 kg/j/m³ sans modifier le débit volumétrique de manière significative et donc en conservant un temps de rétention hydraulique de 20 jours, ce qui est tout à fait convenable. Cette nouvelle charge permet une augmentation réelle du rendement en termes de production de gaz. Lors des relevés au compteur réalisés entre le 01 août 2018 et le 03 septembre 2018, la production moyenne effective journalière est passée à 4.7 m³/jour, soit une augmentation de 59.3% par rapport à la production initiale. Cette production moyenne représente un

temps de cuisson moyen de 6 heures sur un brûleur avec une marmite de 60 Litres. Les relevés journalier au compteur ont continué après la phase du diagnostic et révèle une production de biogaz qui reste dans une moyenne stable de 3 m³/jour avec 3 pics à plus de 4.5 m³/jour sur le mois de septembre (voir annexe 2). L'ajout de déchets organiques dépend du bon vouloir des autorités en charge et des détenus sachant qu'a été constatée une certain manque d'organisation et de régularité dans cet apport supplémentaires des déchets à partir de septembre 2018. A noter que l'augmentation de la charge organique ne devra pas excéder plus de 150kg/jour afin d'éviter une surcharge du digesteur.



Figure 9: Broyage des déchets organiques additionnels par les détenus (Source : J.Jousselin, CICR, 2018)

V.1.5.2 Vers une valorisation du digestat

Le digestat est directement rejeté dans la nature, en aval du biodigesteur, près d'une parcelle agricole de cultures maraîchères. Les analyses de la DCO montrent clairement que les effluents sortants du digesteur sont trop pollués pour être rejetés directement dans l'environnement. En effet, la charge de pollution organique de l'effluent digéré est bien au-dessus avec 3650 mg/L contre 125 mg/L pour la norme européenne relative aux concentrations des rejets des stations d'épuration des eaux urbaines résiduaires, en zone sensible (CEE, 1998). Même si la quantité d'effluents rejetée dans le milieu récepteur est assez faible et que le sol a une grande résilience à la pollution, il est tout de même nécessaire de trouver des solutions qui devront être mises en place dans le futur si l'on souhaite respecter les normes internationales de déversement d'effluent et ainsi éviter tout risque de contamination et de maladies chez l'homme.

Par conséquent, afin de diminuer ce risque de pollution des sols, à l'avenir, une des solutions consisterait en l'installation de traitement dit tertiaire tel un filtre à sable de 2 m² au niveau de la sortie du digesteur constitué de 500 mm d'épaisseur de sable et 300 mm d'épaisseur de graviers. Ce dernier assurerait une étape de traitement supplémentaire. Ce filtre permettrait également de retenir les boues à sa surface, c'est-à-dire les restes solides qui devraient être d'environ de 50kg/jour. Ces dernières seront récupérées et séchées sur un lit de séchage de 6 m² avec 3 compartiments. Ce lit est constitué de 200 mm d'épaisseur de sable et 200 mm d'épaisseur de graviers. Après ces 30 jours, les boues pourront être compostées et utilisées comme

engrais pour les bananiers et autres arbres par exemple. De plus, le TRH actuel de 20 jours permet d'assurer un traitement efficace des boues présentes dans le digesteur, ces boues de sorties présentent donc un potentiel de dégradation anaérobie très faible. Un filtre planté peut aussi être une des options envisageables mais nous ne traiterons pas en détail cette option dans ce rapport. Ces nouveaux ouvrages n'ont pas été mis en place concrètement mais des recommandations concrètes ont été faites aux ingénieurs de l'AP pour une potentielle implantation à l'avenir.

V.1.6 Etat général encourageant du système biogaz

Le processus biologique et le réacteur de digestion présentent dans l'ensemble les caractéristiques d'un bon fonctionnement du biodigesteur et de ses équipements. Les contrôles de terrain sur le système biogaz, les analyses, mesures et calculs réalisés ont mis en évidence que le dispositif ne présente aucune fuite (pression du gaz et dans le dôme jusqu'à 14 mBar indiquant l'étanchéité du digesteur et du circuit de gaz) ni de problème fonctionnel majeur.

Tableau 4: Aperçu général des résultats obtenus du diagnostic (Source : CICR)

| Caractéristique | Valeurs | Objectifs / Observations |
|------------------------------------|---------------------------|--|
| PH | 8 _ 9 | il n'y a pas d'acidification du digesteur |
| Teneur en méthane moyenne | 78% | Gaz de bonne qualité |
| Volume de gaz produits | 2,94 m ³ /j | 1h20 d' autonomie |
| Débit des effluents entrants | 2,5 m ³ /j | |
| Temps de rétention hydraulique | 20 jours | Objectif a la température ambiante locale: 20jrs <x<40 jrs |
| Charge organique dans le digesteur | 0,37 kg/j/ m ³ | Objectif : 1,5 kg/j/ m ³ |

Cependant, ce diagnostic a permis de déceler les causes d'un fonctionnement non optimal de ce système biogaz enterré à dôme fixe. Effectivement et comme expliqué plus haut, le problème principal du système est la qualité des effluents entrants qui est responsable de la mauvaise production de gaz. Les faibles valeurs de MES et de MVS montrent que l'intrant ne contient pas suffisamment de composés organiques à la base de la production de biogaz par le processus anaérobie.

Ce problème provient de trois constats réalisés lors de ce diagnostic :

- Les détenus se nourrissent exclusivement de manioc et leurs excréta sont par conséquent très pauvres en matière organique biodégradable.
- Aucune matière organique n'a été ajoutée au niveau du bassin d'alimentation depuis 2016.
- Le dégrilleur en entrée du bassin de décantation retient une grande partie des matières solides dont les composés organiques sont absolument nécessaires au bon rendement du système.

A savoir que les solutions mises en place ont été énumérées plus haut et sont dans l'ensemble une réussite avec une augmentation constatée de la production de gaz.

V.2 Résultats & solutions mises en place à la MC de Maevatanana

V.2.1 Une amélioration O&M indispensable

Lors du contrôle physique du fonctionnement des ouvrages, le décanteur primaire situé à l'entrée du système a été ouvert. Il a alors été observé que le dégrilleur était complètement obstrué par des déchets solides et des fèces. Une grande partie des matières organiques exploitables par le système et présentes dans les effluents entrants est retenue par le dégrilleur et n'arrive au digesteur qu'une fois par semaine lorsque le dégrilleur est nettoyé (tous les lundis) alors qu'il est nécessaire de l'alimenter quotidiennement. La fréquence de nettoyage du dégrilleur doit être augmentée afin d'optimiser le rendement du système. Il a également été observé que des morceaux de plastique et autres déchets non organiques sont retenus par le dégrilleur. Ces déchets passent à travers les mailles lorsque ce dernier est nettoyé et se retrouvent donc dans le digesteur. Aucun désulfurisateur et aucun de piège à eau ne sont installés sur la conduite.

Suite à ces constats, les solutions concrètes ayant été mises en place sont les suivantes :

- Tout comme pour la MF de Tsiafahy, l'amélioration de l'O&M passant forcément par un renforcement des capacités du personnel exploitant, un **manuel d'utilisation et de maintenance spécifique aux deux prisons étudiées a été élaboré (voir annexe 1) et une formation intensive d'une journée a été dispensée** sur site. Le but de la formation était de sensibiliser l'utilisateur sur les bienfaits de l'utilisation du biogaz et de les former sur les principes de fonctionnement et d'entretien du biodigesteur. La formation s'est basée sur le manuel d'utilisation du biogaz élaboré lors de ce diagnostic. Cette formation s'est déroulée le 09 août 2018 à la MC de Maevatanana. Cet atelier a été consacré à la formation pratique des responsables de maintenance sur les principaux éléments suivants :
 - Formation sur le principe de fonctionnement du biogaz et présentation du biogaz
 - Simulation de l'utilisation du pulvérisateur à eau pour l'entretien du dégrilleur
 - Simulation à la manipulation des vannes du système de conduites
 - Instruction sur la prise et relevé des notes quotidiennes sur le niveau de pression ainsi que le volume de gaz utilisé par jour
 - Simulation de la recherche des fuites et manipulation du piège à eau et du désulfurisateur
 - Simulation de l'entretien des brûleurs

Des affiches explicatives du fonctionnement du biodigesteur et de bonnes pratiques ont été aussi posées sur les murs de la cuisine et dans les quartiers des détenus. Au total 8 personnes ont été formées incluant les 2 Surveillants Généraux intérieur et extérieur de la MC, le magasinier de la MC et 5 détenus en charge de la maintenance des cuisines et du biodigesteur.

- Installation d'un filtre à soufre permettant d'ôter le soufre présent dans le biogaz afin d'éliminer toutes les mauvaises odeurs et de protéger de la corrosion les parties métalliques des brûleurs. Une vanne de dépannage a été aussi installée avec succès.
- Installation d'un piège à eau, situé en amont des brûleurs et au point bas de la conduite. Il permettra d'éliminer l'eau présente dans le gaz sous forme de vapeur au niveau des brûleurs. On améliore ainsi le rendement de conversion thermique des brûleurs car la vapeur d'eau absorbe une partie importante de la chaleur produite par la combustion du biogaz.
- Installation d'un dégrilleur additionnel avec des mailles un peu plus petites pour arrêter les matériaux plastiques sachant que ce système est démontable pour faciliter le nettoyage.
- S'assurer de consommer tout le gaz disponible chaque jour. Pour ce faire en plus d'un compteur volumétrique, un manomètre a été installé au niveau de la cuisine. Il suffit de s'assurer que le manomètre affiche la valeur 0 après utilisation quotidienne des brûleurs.
- S'assurer chaque jour que le dégrilleur du bassin de décantation n'est pas obstrué, auquel cas un nettoyage est nécessaire. Ce dégrilleur doit permettre de retenir les déchets solides les plus grossiers non exploitables par le digesteur, mais ne doit en aucun cas retenir toutes les boues en provenance des latrines. Un pulvérisateur, à pression faible, a été fourni lors de la formation afin que l'exploitant nettoie le dégrilleur pour faire couler les boues dans le digesteur.

V.2.2 Consommation de gaz et évolution de la pression

V.2.2.1 Détermination du volume du gaz

La consommation moyenne journalière de gaz, relevée au compteur entre le 06 juin et le 10 juin 2018 est de 0,3 m³/jour correspondant à seulement 15 minutes de fonctionnement par jour d'un seul brûleur! Les analyses en laboratoire ont montré que la quantité de MVS dans l'échantillon d'entrée de la MC est de 5,1 kg/jour et à la sortie est de 1,8 kg/jour ; la quantité MVS transformée est donc (entrée - sortie) de 3,3 kg/jour.

Le potentiel moyen théorique de biogaz de MVS pour l'excréta humain lié à un régime alimentaire normal est de 0,6 m³/kg ainsi théoriquement le volume de gaz obtenu pour 3,3 kg/jour est 3,3 kg x 0,6 m³/kg = 2 m³/jour. La production moyenne par jour est de 0.3 m³ par jour. Cette différence importante entre la quantité de biogaz produite et celle attendue nécessite un calcul de pression afin de comprendre ce phénomène et d'en tirer des conclusions.

V.2.2.2 Etat de la pression du gaz

La détermination de la pression a été réalisée en vidant tous les gaz et en notant par la suite l'augmentation de la pression pendant 24 heures, du 05 juin 2018 de 13 heures jusqu'au 6 juin 2018 à 13 heures. La pression de gaz n'a pas dépassé les 5,5 KPa. Cette étude a été poursuivie en formant et en gardant le contact avec le chef d'établissement de la MC de Maevatanana à qui il a été demandé de reprendre la surveillance de l'évolution de la pression sur un nouveau test et cela pendant 48h. Les valeurs ont été prises du mercredi 13 juin 2018 à 9h après l'utilisation du gaz jusqu'au vendredi 15 juin 2018 à 9h. Le résultat obtenu n'a pas changé. La pression a augmenté de 5,5 KPa le mercredi de 9h à 14h et stagnait à 5,5 KPa jusqu'au vendredi à 9h. Nous démontrons ici que la production de gaz de 0.3m³ correspondant à 5.5 KPa déterminée précédemment, est produite en seulement 5 h. La production de biogaz n'est ensuite plus stockée en raison soit d'une fuite ou soit d'un problème de porosité au niveau du dôme du digesteur.

Afin de déterminer le problème de ce digesteur, il a fallu calculer le volume de gaz pour une pression de 5,5 KPa qui semble être le maximum de pression stockable dans le digesteur. De là, nous pouvons calculer le volume pour 5,5 KPa grâce au plan du digesteur. Le logiciel Solidworks a été utilisé pour obtenir cette valeur précise, ainsi nous avons obtenu :

→ **Pour une pression de 5,5 KPa on a un volume de 1,16 m³**

Ensuite, a été calculé le volume de gaz qui doit normalement être produit à cette pression de 5,5 KPa :

→ D'après la loi du gaz parfait, on a : **$P_1 * V_1 = P_2 * V_2$**

Avec **P_1** (pression atmosphérique) = **101 KPa** ; **P_2** (pression gaz + pression atmosphérique) = **106,5 KPa**

→ **V_1** le volume à déterminer qui devrait être le gaz utilisé ; **V_2** (le volume pour 5,5 KPa) = **1,16 m³**

Nous avons **$V_1 = (P_2 * V_2) / P_1 = (106,5 * 1,16) / 101$**

On a par conséquent, **$V_1 = 1,2 m^3$** , c'est-à-dire le volume de gaz sortant qui devrait être consommé par les brûleurs. Ce chiffre est à comparer avec le résultat empirique de **0,3 m³** qui a été observé au niveau du

brûleur grâce au relevé fait avec le compteur volumétrique installé. La différence entre la quantité de biogaz produite et celle attendue peut s'expliquer par les phénomènes suivants:

- ✓ **La présence de croûtes trop épaisses et solides à l'intérieur du digesteur**, créées par les bouses de zébus pendant le démarrage et la tentative de relance du digesteur, et qui empêchent l'augmentation du volume de gaz tout en continuant à faire sortir le liquide vers l'exutoire. Cette croûte étant fixe, et peu flottante, il se peut qu'elle occupe le volume sur le dessus de la surface du liquide, ce qui réduit l'espace disponible pour le gaz et de ce fait réduit le volume de gaz stockable au-dessus du liquide du digesteur.
- ✓ **Le digesteur n'est pas étanche**, avec une potentielle fuite de gaz au niveau de 55 – 60 cm du dôme de stockage. La porosité du dôme sur cette partie peut être aussi envisagée avec une pression maximum estimée pour ce digesteur à 16 KPa lorsque nous n'obtenons que 5,5 KPa.

Pour remédier à ce problème majeur au niveau du biodigesteur, la solution temporaire retenue a été la mise en place d'un système à volume variable de stockage de biogaz avec l'installation d'une pompe à gaz solaire dotée d'un réservoir de stockage souple de 2 m³. Ainsi le niveau de liquide dans le digesteur reste stable au-dessus de la zone de porosité ou de fuite du gaz et le gaz ne s'échappe plus. La pression dans le digesteur est proche de la pression atmosphérique, en revanche le réservoir souple gonfle en se remplissant de biogaz et la pompe solaire est utilisée pour aspirer le gaz dans le sac pendant la cuisson.

Cette solution est une bonne alternative temporaire afin de permettre d'améliorer le rendement du digesteur sans avoir à procéder à une expertise coûteuse et à des travaux de réfection qui seront certainement nécessaires sur la partie intérieure du dôme où la fuite est détectée. Une vidange ainsi que le retrait des croûtes de bouses de zébu accumulées seraient aussi nécessaire. D'après les relevés, la production moyenne effective chaque 2 jours est de 1.83 m³ contre 0.6 m³/jour avant l'installation de la bâche de stockage. Ces données révèlent que la production de biogaz est soit, pas encore à son optimal, mais est désormais correcte stable et surtout exploitable. Le biogaz stocké est utilisé tous les deux jours pour la cuisson de manioc sec avec de l'eau chaude venant des panneaux solaires. La durée moyenne de cuisson au méthane est de 4h30mn avec une marmite de 120 Litres sur un seul brûleur. Le manioc est semi-cuit et la cuisson est finalisée par l'utilisation du bois de chauffe.



Figure 10: Bâche de stockage de méthane de capacité de 2 m³ (Source : J.Jousselin, CICR, 2018)

V.2.3 Une charge organique trop faible des effluents entrants

Le calcul de débit des effluents entrants a été basé sur l'observation du remplissage du bassin d'alimentation du système biogaz sur 24 heures. Sachant que le volume de ce bassin est de 2,38 m³ ; on en déduit le débit horaire qui est de 0,05 m³/h environ et un débit journalier qui est de 1,3 m³/jour. Grâce à ce débit, les deux paramètres essentiels au bon fonctionnement d'un digesteur peuvent être déterminés :

- Le TRH est de 23 jours avec un débit entrant de 1,3 m³/jour et un volume du digesteur qui est de 30 m³. Pour un climat comme celui de la MC de Maevatanana, ce TRH est convenable pour la température ambiante du digesteur dans ce contexte local avec une température estimée au-dessus de 20 à 25°C.
- La charge organique par mètre cube de digesteur est déterminée à partir des analyses qui ont été réalisées en laboratoire sur les échantillons entrants prélevés au niveau du bassin d'alimentation et du débit. On obtient une charge solide de 0,25 kg/jr/m³ du digesteur à partir des concentrations en MES. C'est la MVS qui représente la part organique des solides présents dans le digesteur. Parmi les MES, on trouve 70% de MVS, ce qui donne une charge organique de 0,17 kg/m³/jr. Cette charge devrait être comprise entre 1 et 3 pour un fonctionnement optimal du digesteur. Cette notion de charge organique correspond à la quantité de « nourriture » avec lequel le digesteur est nourrit. Cette charge trop faible est très révélatrice du problème rencontré en indiquant clairement que l'on nourrit le digesteur avec suffisamment de volume mais pas avec suffisamment de matière à consommer par les bactéries pour produire du biogaz.

V.2.4 Une composition de gaz optimale

Le pH, mesuré avec les échantillons prélevés, est de 8. Le pH attendu pour un digesteur de ce type doit être compris entre 7 et 9. Il n'y a donc ici aucune acidification du digesteur et le pH des effluents est convenable pour un bon fonctionnement du système. Concernant les tests de composition de gaz, les résultats sont excellents avec 72% de teneur en méthane. Ces tests démontrent donc que le biogaz est de bonne qualité avec une teneur en méthane excédent les 70% qui est la limite minimale pour une bonne composition.

V.2.5 Des analyses révélatrices de disfonctionnements

V.2.5.1 Matière organique à taux trop faible

Les résultats des analyses effectuées en laboratoires sur les effluents entrants et sortants du système biogaz sont les suivants:

Tableau 5: Résultats des analyses en laboratoires de l'effluent (Source : CICR)

| Paramètres analysés | Echantillon n°1 Effluent | Echantillon n°2 Effluent | Echantillon n°3 Effluent | Echantillon n°4 Effluent |
|---------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Entrée 1 Regard | Entrée 2 Bassin Alimentation | Sortie Biodigesteur | Sortie Biodigesteur |
| MES % | 0.58 | 0.58 | 0.32 | 0.62 |
| MES mg/L | 5700 | 5700 | 3150 | 6050 |
| MVS % de MES | 70 | 71 | 44 | 70 |
| MVS mg/L de MES | 4000 | 4050 | 1400 | 4250 |
| DCO mg/L | 2780 | | 1080 | |

On observe que la teneur en MES de 0,58% des effluents entrant est bien trop faible pour permettre une grande production de biogaz. Les effluents sont trop pauvres en matières organiques digérables par le système pour produire du biogaz. Ce problème provient essentiellement de l'alimentation des détenus qui ne consomment que du manioc en quantité rationnée avec une moyenne de seulement 300 grammes de manioc par jour et par détenu!

A noter que les analyses de l'échantillon n°4 sont erronées; cela est dû à une mauvaise manipulation de laboratoire (pas complètement séché à la sortie du four). Cet échantillon n'a donc pas été utilisé pour les résultats. Ainsi pour les calculs de l'abattement de la MVS, ils ont été faits à partir des résultats des échantillons Entrant 1 et Sortant 1. On observe un abattement sur les trois paramètres MES, MVS et DCO, ce qui nous indique que le traitement dans le digesteur permet de réduire la pollution des effluents. Pour les analyses de MES de l'intrant, nous retiendrons celles réalisées sur le prélèvement fait au niveau du bassin d'alimentation qui est plus représentatif de l'effluent dans le digesteur. L'abattement de la MVS est de l'ordre de 65% ce qui prouve que le digesteur fonctionne assez bien.

Malheureusement, suite à ce constat, aucune optimisation de la production de biogaz par une augmentation régulière de la quantité de matière digérable en entrée du digesteur à travers l'apport de déchet organique

broyé n'a pu être réalisée. Le niveau d'appropriation du projet par l'AP est très faible et l'implication des agents de l'AP et des responsables de maintenance des ouvrages d'assainissement n'est pas suffisante pour mettre en place une telle activité qui demande rigueur, régularité et un très bon sens d'organisation.

V.2.5.2 Post traitement et valorisation du digestat

Le digestat est directement rejeté dans la nature en aval du biodigesteur dans une parcelle d'agriculture de bananiers. Les analyses de la DCO montrent que les effluents sortants du digesteur sont trop pollués pour être rejetés directement dans l'environnement. En effet, la charge de pollution organique de l'effluent digéré est bien au-dessus avec 1400 mg/L. Cependant, au vu des résultats de DCO et MES, la diminution de la pollution dans le procédé est « acceptable » et prouve un bon fonctionnement du biodigesteur. Cet effluent de sortie contient toujours de la matière organique et peut faire un bon engrais pour l'amendement des sols mais il faut s'assurer de prendre les précautions requises pour éviter les risques de contaminations par les agents pathogènes restants.

Afin de diminuer partiellement ce risque de pollution des sols, une des solutions retenue a été l'installation d'un filtre à sable de 2 m² au niveau de la sortie du digesteur. Il est constitué de 500 mm d'épaisseur de sable et 300 mm d'épaisseur de graviers. Ce dernier permet d'assurer une étape de traitement supplémentaire. Ce filtre permet de retenir les boues à sa surface, c'est-à-dire les restes solides qui devraient être environ de 30 kg/jour. Ces dernières sont récupérées par les détenus et mises à sécher au soleil à même le sol. Les boues une fois séchées pourront être compostées, utilisées comme engrais pour les bananiers et autres arbres mais il faut proscrire l'épandage sur les cultures maraîchères pour éviter une contamination par les bactéries non éliminées. Lors de la formation, un exercice pratique a été dispensé aux responsables de la maintenance, en insistant sur les recommandations de protection lors des manipulations du digestat.



Figure 11: Filtre à sable installé pour un post traitement naturel du digestat (Source : J.Jousselin, CICR, 2018)

V.2.6 Impact sanitaire et enjeux environnementaux

L'étude d'impact environnemental réalisée a eu pour objectif d'identifier les enjeux environnementaux. Le tableau ci-après dresse la liste des impacts du projet de biogaz sur l'environnement de la zone décrite plus haut.

Tableau 6: Liste des impacts sur l'environnement du biogaz à la MC de Maevatanana (Source : CICR)

| Thématique | Description | Impact | Niveau d'impact | Intensité de l'impact |
|---------------------------------|---|---------|-----------------|-----------------------|
| Topographie du site | Les effluents (eaux usées et digestat) circulent vers les bas-fonds. Les liquides s'écoulent lentement et ne créent pas de changement significatif de la topographie (pas de creusement de rivière d'eaux usées important). | Négatif | Faible | Acceptable |
| Pédologie | Le sol a une perméabilité moyenne : <ul style="list-style-type: none"> ▪ concernant les rejets des eaux domestiques, en raison des potentiels résidus de produits de nettoyage, celles-ci peuvent venir modifier la perméabilité des sols et réduire le potentiel d'infiltration. ▪ concernant le rejet de digestat, il n'y a, à priori, quasiment pas d'impact. | Négatif | Moyen | Acceptable |
| Hydrogéologie | Infiltration des eaux usées dans les nappes : il y a un risque de pollution par les eaux usées, notamment avec les détergents mais ce risque reste faible car le sol dispose d'une bonne capacité d'épuration naturelle. | Négatif | Faible | Acceptable |
| | Pour le digestat, il y a un risque de contamination des nappes souterraines par la présence d'agents pathogènes (risque pour les puits existant situés à l'aval de l'exutoire du digestat). | Négatif | Fort | Notable |
| Hydrographie | Circulation des eaux usées et du digestat dans les eaux superficielles. Pour les eaux usées, il n'y a pas de problèmes car la dilution minimise le risque. Il en est de même pour le digestat. | Négatif | Faible | Acceptable |
| Faune & flore | Pas d'enjeu environnemental sur ce point de vue | Négatif | Négligeable | Acceptable |
| Activité agricole | Le digestat améliore le rendement agricole en apportant des nutriments et en contribuant à entretenir ou restaurer l'humidification du sol. | Positif | Fort | Acceptable |
| Habitat et rejet de digestat | Des ménages sont situés à proximité du site d'emplacement du biodigesteur. Le digestat qui est déversé dans la nature constitue une nuisance (odeur) pour le voisinage surtout pour les ménages situés près des canaux naturels d'évacuation. | Négatif | Moyen | Notable |
| Ressources en eaux souterraines | La zone d'étude n'est pas incluse dans un périmètre de protection de captage d'eau potable à grande échelle. Cependant, il existe des captages d'eaux souterraines (puits) qui présente un fort risque de contamination. | Négatif | Fort | Notable |

Trois impacts jugés notables ont été relevés : la potentielle pollution du sol et du sous-sol, la potentielle pollution des eaux souterraines et l'émission d'odeurs nauséabondes. Ces trois impacts sont liés au rejet du digestat en lui-même. Dans ce contexte, des mesures d'atténuations sont tout à fait envisageables et ont pour but d'éliminer, de minimiser, de compenser ou de prévenir les impacts négatifs et ainsi d'améliorer les retombées positives du projet sur l'environnement.

Concernant la pollution des sols, sous-sol et eaux souterraines, l'effluent liquide du digestat doit subir des post traitements adaptés au contexte tel que le filtre à sable et le filtre planté. On pourra aussi recourir à la mise en place d'un système de rétention naturelle du liquide contaminé par l'installation d'un puisard à massif filtrant. Cette mesure permet d'éviter la pollution du sol et des eaux ainsi que la diffusion de cette

pollution en aval. Il est aussi important d’informer les habitants vivant en aval du digesteur qu’il ne faut pas utiliser l’eau des puits pour l’usage domestique surtout pas pour la boisson et les préparations culinaires. Si les habitants n’ont aucune autre alternative d’approvisionnement en eau, il est impératif de recourir à un traitement de désinfection par la chloration avant d’utiliser cette eau. Concernant le puits situé juste en contre bas à environ 10 mètres du bac d’alimentation, cette eau ne doit absolument pas être utilisée excepté pour le nettoyage de l’outillage par exemple. En ce qui concerne la nuisance olfactive, l’installation du filtre à sable et le séchage des boues sur lit devraient aider à réduire les émissions d’odeurs désagréables pour le voisinage.

V.2.7 Etat général mitigé du système biogaz

Le processus biologique de digestion présente dans l’ensemble les caractéristiques d’un bon fonctionnement du biodigesteur. Cependant, les contrôles de terrain sur le système biogaz, les analyses, les mesures et les calculs réalisés ont mis en évidence un problème majeur au niveau du dôme du biodigesteur : la présence d’une fuite et/ou d’un problème de porosité au niveau du dôme fixe. De plus, le volume de gaz contenu dans le dessus du dôme du digesteur est plus faible qu’attendu en raison probablement d’une croûte trop épaisse et solide qui obstruerait l’espace disponible pour le volume de gaz dans le réacteur.

Tableau 7: Aperçu général des résultats obtenus du diagnostic (Source : CICR)

| Caractéristique | Valeurs | Objectifs / Observations |
|------------------------------------|---------------------------|---|
| PH | 7 _ 9 | il n’y a pas d’acidification du digesteur |
| Teneur en méthane moyenne | 72% | Gaz de bonne qualité |
| Volume de gaz produits | 0,3 m ³ /j | 15 mn d’ autonomie |
| Pression de gaz | 5,5 KPa | Pression de 10 KPa < P < 15 KPa |
| Débit des effluents entrants | 1,3 m ³ /j | |
| Temps de rétention hydraulique | 23 jours | Objectif à la température ambiante locale: 20jrs < x < 40 jrs |
| Charge organique dans le digesteur | 0,25 kg/j/ m ³ | Objectif : 1,5 kg/j/ m ³ |

Ce diagnostic a aussi permis de déceler d’autres causes de disfonctionnement de ce système biogaz enterré à dôme fixe. Comme expliqué plus haut, l’autre problème du système est la qualité des effluents entrants responsable de la mauvaise production de gaz. Les faibles valeurs de MES et de MVS montrent que l’intrant ne contient pas suffisamment de composés organiques, responsables de la production de biogaz par le processus anaérobie. Ce problème provient de trois constats réalisés lors de ce diagnostic :

- Les détenus se nourrissent exclusivement de manioc et leurs excréta sont par conséquent très pauvres en matières organiques biodégradables.
- Aucune matière organique additionnelle n’a été ajoutée au niveau du bassin d’alimentation depuis 2017.

- Le dégrilleur en entrée du bassin de décantation retient une grande partie des matières solides dont les composés organiques sont absolument nécessaires au bon rendement du système.

Les solutions mises en place ont été énumérées plus haut et sont dans l'ensemble une réussite. Toutefois, l'installation du sac flexible de stockage de gaz et de son kit de pompage solaire est une solution temporaire. Il est clair que des solutions plus durables devront être trouvées pour qu'à l'avenir le réacteur du biodigesteur puisse fonctionner normalement.

VI. Conclusion et perspectives

Le développement du système biogaz dans le monde et plus particulièrement en Afrique est un des moyens de lutte contre le changement climatique. Ceci est plus particulièrement vrai pour Madagascar qui subit de plein fouet les impacts environnementaux négatifs de ce changement en plus des problèmes sérieux de déforestations massives sur le plan national que connaît l'Ile Rouge.

Sur le plan national, le gouvernement de Madagascar, tout comme la plupart des gouvernements des pays d'Afrique, développe de plus en plus l'utilisation du biogaz. Tous ces pays devront adapter, développer, structurer leurs politiques publiques, leurs stratégies et les plans nationaux d'assainissement en intégrant clairement le biogaz dans leurs projets urbains et ruraux d'envergure. Il est primordial que « des changements institutionnels et technologiques majeurs fassent en sorte que le réchauffement climatique ne dépasse pas le seuil critique » (UN, 2019).

Le renforcement des capacités de la filière biogaz à l'échelle nationale qui s'est enclenché depuis 3 ans à Madagascar devra continuer dans ce sens en attachant un soin particulier au développement de la recherche sur une technologie biogaz adaptée au contexte malgache et en démocratisant le biogaz au sein de la population malgache.

Il est indéniable que l'installation des bio digesteurs en milieu carcéral telle que réalisée depuis 2002 dans 4 pays par le CICR, fait partie d'une réponse concrète afin d'œuvrer à l'adaptation de ces changements climatiques. Cette technologie verte à échelle communautaire est indéniablement un moyen, parmi d'autres, d'assainir les prisons malgaches en diminuant drastiquement les risques de maladies liées à l'eau, en utilisant le méthane comme combustible et ainsi réduire la consommation de bois de chauffe et en améliorant les conditions de détentions de manière plus générale.

Dans cette approche, le CICR a acquis ses 17 dernières années une expertise solide dans la conception, la construction et l'exploitation des systèmes biogaz dans les prisons. Par cette expérience, le CICR pourra

continuer dans un futur proche à promouvoir le biogaz en milieu carcéral mais aussi et pourquoi pas sur ses autres types et contextes d'interventions sur le terrain (projets dans les camps de réfugiés et/ou déplacés, projets d'assainissement en zone urbaine et rurale pour les populations civiles...) en incorporant cette technologie dans sa stratégie interne opérationnelle d'une manière plus formelle pour l'ensemble des programmes dans le monde.

Ce diagnostic a démontré certaines limites en termes d'Opération & Maintenance et en termes de valorisation des effluents du biodigesteur. Les hypothèses d'origines ont dans l'ensemble pu être confirmées. Ce diagnostic a permis aussi de mettre en évidence l'importance d'un apport régulier supplémentaire de matières organiques diversifiées dans le biodigesteur afin d'augmenter la production de méthane et la nécessité de mettre en place des solutions adaptées pour une meilleure valorisation du digestat.

Sur le plan organisationnel au sein de l'AP, cette évaluation a révélé le manque réel d'appropriation des ouvrages de biogaz par le personnel de l'AP et par les prisonniers souvent mal encadrés et surtout mal formés pour effectuer une maintenance optimale des ouvrages. Il est primordial, à l'avenir, sur ce type de projet, qu'une attention particulière et indispensable soit mise dès le départ du cycle de projet sur la maintenance du système biogaz. Les performances d'un tel système peuvent être sérieusement mises en péril si les fondamentaux de maintenance et le suivi de la production ne sont pas mis en place dès le départ. Pour cela, il faudra exiger des autorités compétentes du pays une appropriation totale du projet et un engagement sans faille pour la maintenance et le suivi de performance de l'ouvrage à moyen et long terme.

Le transfert de compétences a finalement pu être réalisé lors de cette évaluation par une formation avancée des équipes en charge des 2 biogaz dans les 2 prisons et par l'élaboration d'un manuel de maintenance complet qui standardise les différentes étapes et tâches à réalisées. De plus, un ingénieur au niveau central du Ministère de la Justice a été formé et responsabilisé pour le suivi régulier du bon fonctionnement de ces deux systèmes de biogaz. A l'avenir, le suivi précis et minutieux opérés pendant ces derniers mois sur site devra continuer par les autorités pénitentiaires malgaches. Les solutions concrètes mises en place dans les 2 prisons devront être analysées et améliorées si nécessaire. La durabilité d'un tel projet biogaz dépend évidemment aussi bien du facteur qualité de construction (ce qui est clairement acquis dans ce cas) que du facteur régularité et type de maintenance appropriée de l'ouvrage. La réussite de tel projet ne peut se faire que par une gestion patrimoniale durable et efficace des infrastructures.

Pour le futur, l'AP malgache a toutes les cartes en mains pour suivre et maintenir en fonctionnement optimal les systèmes de biogaz installés dans les prisons et pourquoi pas promouvoir, dans un futur proche, la construction de nouveau système biogaz dans de nouvelles prisons ceci dans l'approche globale de lutte contre les changements climatiques.

VII. Références

VII.1 Références bibliographiques

- Anand R. C. and Singh R. (1993), A simple technique, charcoal coating around the digester, improves
- Andriamanohiarisoamanana F. (Dr.) (janvier 2019): Study on farmers' willingness to pay for biodiester in Madagascar. Project Satoyama Energy. Ecology Online / Satoyama, Japan
- Communauté Economique Européenne (1998): Directive 91/271/CEE relative au traitement des eaux résiduaires urbaines & AGRBC du 23 mars 1994 relatif au traitement des eaux résiduaires urbaines (et son arrêté modificatif du 8 octobre 1998).
- Core-Dev Engineering (avril 2015): Etude d'Avant-Projet Détaillé de mise en place d'un système de production de Biogaz à la Maison de Force de Tsiafahy, Madagascar pour le CICR. Core-Dev Bureau études, conseils, ingénierie, communication, formation
- Deublein, D., Steinhauser, A. (2011): Biogas from Waste and Renewable Resources. 2nd Edition, Wiley-VCH Verlag, Weinheim
- Devkota, G.P. (2011): Biogas Digester Assessment in Places of Detentions in the Philippines. Practical Action Consulting
- EREP (2004): Évaluation des systèmes d'assainissement adaptés au contexte des prisons rwandaises
- Etc Rongead (novembre 2017), Capitalisation des expériences biogaz et foyers améliorés à Madagascar
- Etc Rongead (novembre 2018), Atelier régional de lancement du Projet Biogaz DIANA
- GIZ (février 2017), Renforcement des conditions et capacités d'adaptation durable au changement climatique (PRCCC), Programme d'Appui à la Gestion de l'Environnement, fiche technique de projet
- Guidotti, G. (2002): Biogas from Excreta – Treatment of faecal sludge in developing countries. A state-of-practice review. Sandec/Eawag
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (janvier 2019), Global warning of 1.5°C, Summary for Policy makers
- Kreditanstalt für Wiederaufbau KfW (2009): Biogas Audit Nepal 2008; Volume 1,2,3, KfW Frankfurt, USTB Beijing
- Lohri Christian Riuji (janvier 2012): Water & Habitat – PRISONS -N°1, SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT BIOGAZ DANS LES PRISONS: Rapport de l'état des lieux Enseignements du Rwanda, Népal et Philippines – Rapport final, 18 janvier 2012, Soumis au Comité International de la Croix-Rouge, unité Eau & Habitat
- Lohri C. (2012): Ensuring appropriateness of biogas sanitation systems for prisons: analysis from Rwanda, Nepal and the Philippines. Sandec/Eawag, Switzerland

- Lohri, C. (2011): Feasibility Assessment Tool for Urban Anaerobic Digestion in Developing Countries. A participatory multi-criteria assessment from a sustainability perspective applied in Bahir Dar, Ethiopia. MSc thesis at Wageningen University in collaboration with Eawag/Sandec.
- Lohri, C. (2009): Evaluation of Biogas Sanitation Systems in Nepalese Prisons. Sandec/Eawag, Switzerland.
- Mengistu, M.G., Simane, B., Eshete, G., Workneh, T.S., 2015. A review on biogas technology and its contributions to sustainable rural livelihood in Ethiopia. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 48, p. 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.026>
- Mottet, A. (2009) : Évaluation des systèmes biogaz des prisons rwandaises, EREP, N°: 09-5001-AM
- Rennuit Charlotte (janvier 2013), Decision support for constructing simple biogas digesters for poor farmers in cold environments: Using an average pig farm in Vietnam as an example Individual Project Final master studies project Supervisor: Dr. Sven G. Sommer
- Scarlet N., Dallemand JF, Fahl F. (August 2017): Biogas Development and Perspectives in Europe. European Commission, Joint Research Centre, Directorate for Energy, Transport and Climate, Via E. Fermi 2749 – TP 450, Ispra, VA 21027, Italy
- Tilley, E., Lüthi, C., Morel, A., Zurbrügg, C., Schertenleib, R. (2008): Compendium of Sanitation Systems and Technologies, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Duebendorf, Switzerland
- World Health Organization WHO (2006): WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and grey water; Volume 4: Excreta and grey water use in agriculture

VII.2 Références de sites internet

- Carbon credits serve-up clean cooking options for west african farmers, BANQUE MONDIALE, consulté le 12/04/2019 <https://www.banquemondiale.org/fr/news/feature/2018/03/06/carbon-credits-serve-up-clean-cooking-options-for-west-african-farmers>
- Le biogaz, un allié sans pareil contre les changements climatiques, BIOGAS WORLD, consulté le 02/03/2019 <https://www.biogasworld.com/fr/news/biogaz-changements-climatiques/>
- Objectifs de Développement durable (ODD 2030), PNUD, consulté le 02/03/2019 <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/climate-change-2/>

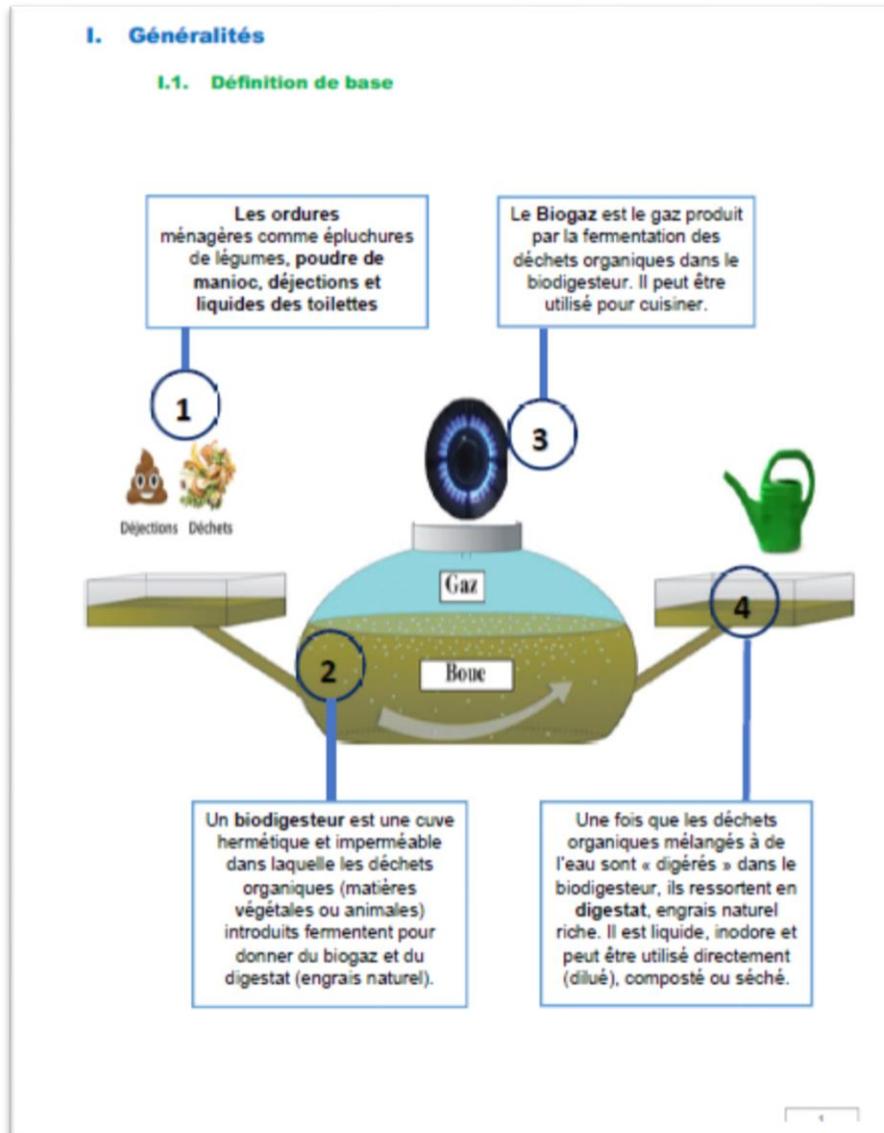
VIII. Annexes

Table des annexes

| | |
|--|----|
| A1 Manuel de maintenance et d'utilisation du système biogaz pour la MF de Tsiafahy et pour la MC de Maevatanana | 40 |
| A2 Relevé de production de Biogaz à la MF de Tsiafahy du 04 Septembre 2019 au 30 mars 2019 | 56 |

A1 Manuel de maintenance et d'utilisation du système biogaz pour la MF de Tsiafahy et pour la MC de Maevatanana (Source : CICR)

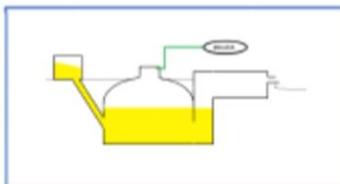




I.2. Principe de fonctionnement du biogaz

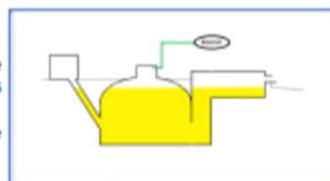
Etape 1 :

Alimentation du digesteur à l'aide du mélange ordures broyées, déjections humaines et eau



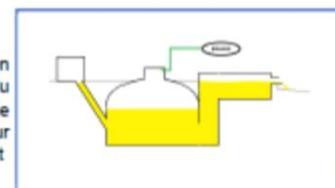
Etape 2 :

Digestion du mélange par les bactéries entraînant la production de biogaz



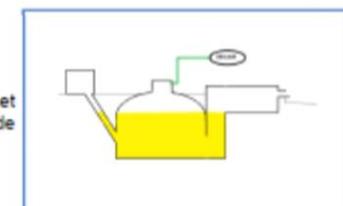
Etape 3 :

Montée en pression du gaz, baisse du niveau du liquide dans le digesteur et sortie du digestat



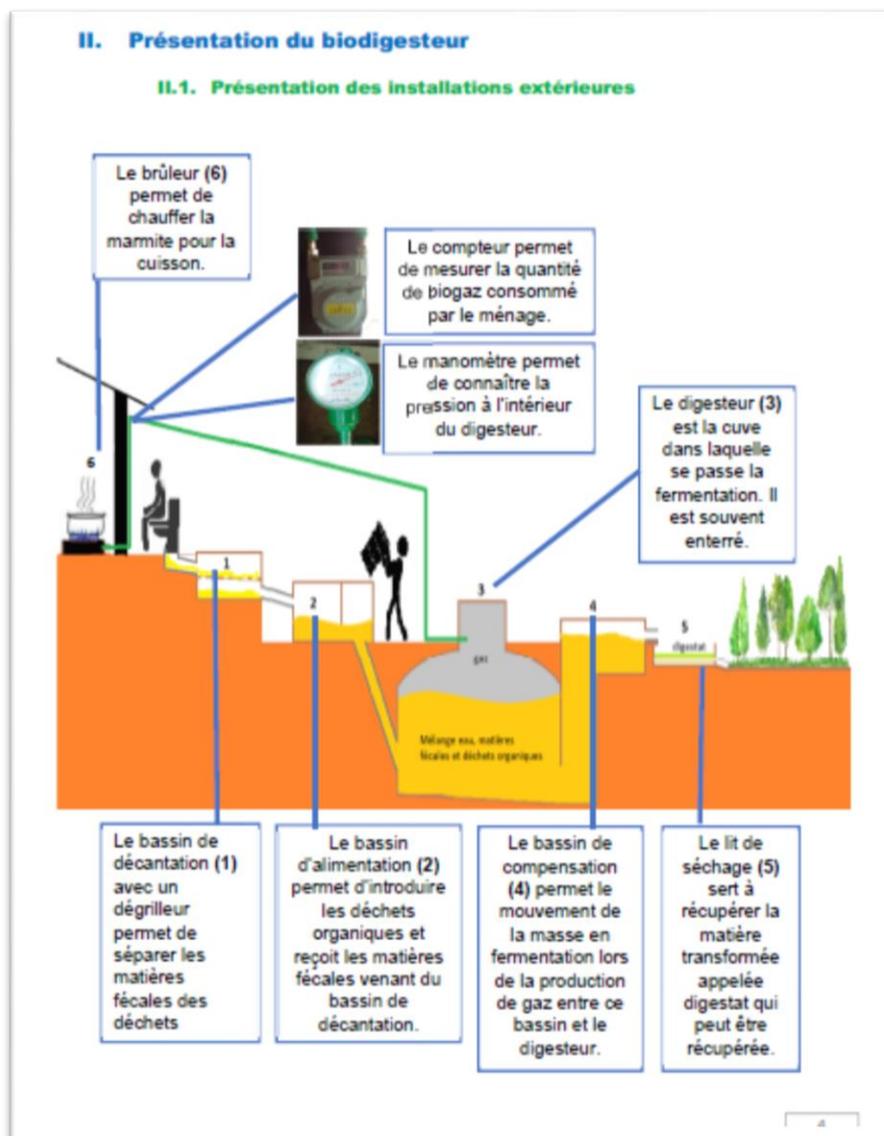
Etape 4 :

Utilisation du gaz et remontée du liquide dans le digesteur



1.3. Avantages

| | |
|---|---|
|  | Réduction de l'utilisation du bois de chauffe et réduction des coûts en fonction de la production de gaz |
|  | Réduction des maladies dues à la fumée dégagée par la cuisson au bois de chauffe |
|  | Possibilité de développement des cultures agricoles dans l'enceinte de la prison |
|  | Réduction de la pollution des excréta de la prison et réduction de la contamination par les pathogènes dans les effluents de sortie de la prison dans l'environnement |
|  | Réduction des tas d'ordures dans l'enceinte de la prison |

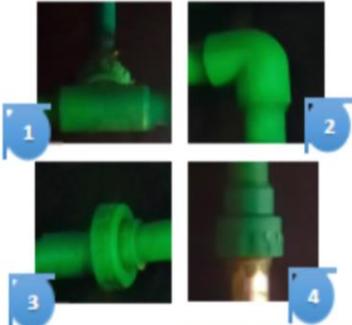


II.2. Présentation des installations intérieures

II.2.1. Tuyauterie et accessoires

- Les tuyaux utilisés pour la tuyauterie biogaz sont en PPR 20.

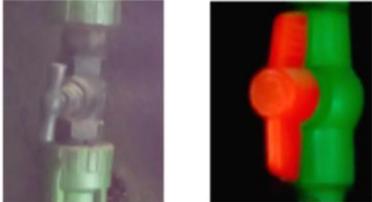
Des raccords droits, en T (1) ou en coude (2) permettent de relier les tuyaux entre eux de manière hermétique. Le raccord Union (3) et l'embout taraudé (4) sont les pièces pour démonter le circuit en cas de dépannage.



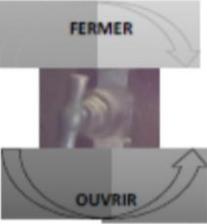
Le filtre à soufre (H2S) composé de paille de fer dans un tuyau permet de purifier le biogaz avant son utilisation pour réduire les impuretés qui peuvent endommager les terminaux.



Les vannes servent à ouvrir ou fermer le passage du biogaz dans le circuit



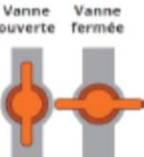
FERMER

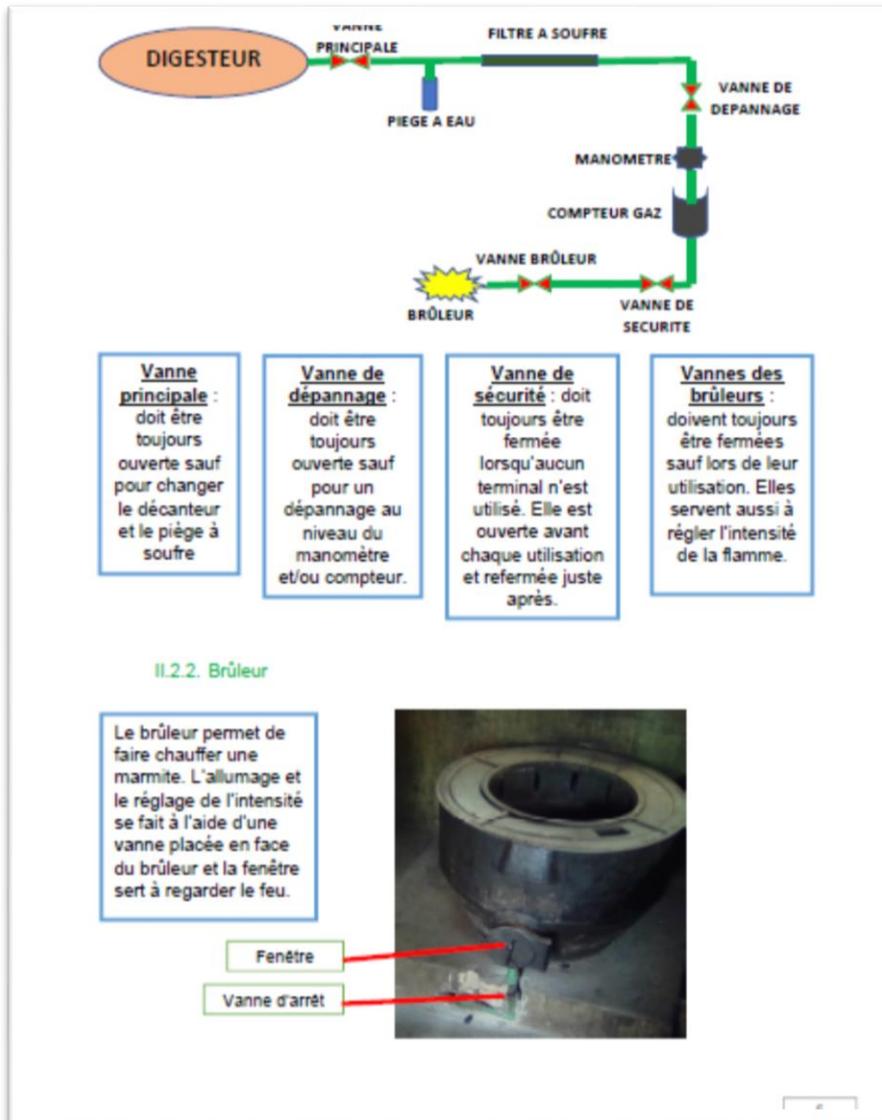


OUVRIR



Vanne ouverte Vanne fermée





III. Utilisation du biodigesteur

III.1. Comment remplir le digesteur?

III.1.1. Règles générales

Il faut :

- charger le biodigesteur tous les jours avec les déchets organiques hachés
- le charger après utilisation du biogaz c'est-à-dire après la cuisson du matin

Pour charger le biodigesteur, il faut :

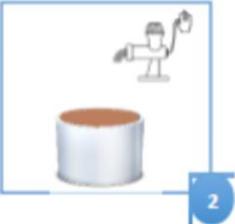
- Trier les déchets de la poubelle : retirer les plastiques, les boîtes de conserves et tout ce qui n'est pas biodégradable (1)



1

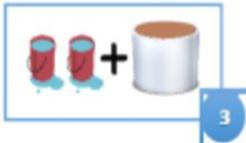
Plastique à retirer

- Broyer les épluchures de fruits et légumes, les feuilles de bananiers, les restes de manioc,..... et les récupérer dans le même bac à ordure. (2)



2

- Rajouter deux seaux d'eau de 20 Litres chacun aux déchets broyés et mélanger bien à l'aide d'une pelle jusqu'à ce que le mélange soit homogène (3)
- Verser le mélange dans le bassin d'alimentation



3

III.2. Comment allumer les brûleurs ?

III.2.1. RELEVER LA VALEUR DE LA PRESSION ET LE COMPTEUR

Vérifier et noter la pression sur le manomètre ainsi que le numéro du compteur avant d'allumer le brûleur



III.2.2. ALLUMER UN FEU DU BRÛLEUR

- Ouvrir la vanne de sécurité (1)
- Brûler un bout de papier (2) puis ouvrir la vanne du brûleur (1) et mettre le papier en feu au-dessus du brûleur pour l'allumer
- Poser la marmite sur le four pour débiter la cuisson (3)



III.2.3. ETEINDRE LE FEU DU BRÛLEUR

Une fois le gaz épuisé, en notant que la pression indiquée au manomètre devrait être à 0 KPa, refermer la vanne du brûleur et la vanne de sécurité.



CONSEILS D'UTILISATION

- L'intensité de la flamme peut être réglée selon le besoin en tournant légèrement la vanne du brûleur (vers la gauche ou vers la droite).
- Il faut vider le gaz tous les jours.

III.2. Comment allumer les brûleurs ?

III.2.1. RELEVER LA VALEUR DE LA PRESSION ET LE COMPTEUR

Vérifier et noter la pression sur le manomètre ainsi que le numéro du compteur avant d'allumer le brûleur



III.2.2. ALLUMER UN FEU DU BRÛLEUR

- Ouvrir la vanne de sécurité (1)
- Brûler un bout de papier (2) puis ouvrir la vanne du brûleur (1) et mettre le papier en feu au-dessus du brûleur pour l'allumer
- Poser la marmite sur le four pour débiter la cuisson (3)



III.2.3. ETEINDRE LE FEU DU BRÛLEUR

Une fois le gaz épuisé, en notant que la pression indiquée au manomètre devrait être à 0 KPa, refermer la vanne du brûleur et la vanne de sécurité.



CONSEILS D'UTILISATION

- L'intensité de la flamme peut être réglée selon le besoin en tournant légèrement la vanne du brûleur (vers la gauche ou vers la droite).
- Il faut vider le gaz tous les jours.

• **Fuite de biogaz**



Si la pression du biogaz est anormalement faible : pression en dessous de 6 KPa (1) ou flamme faible (2), il faut vérifier la présence potentielle de fuite sur certains endroits critiques de l'installation, au niveau des vannes et de la tuyauterie (raccords, coudes, T), à l'aide de l'eau savonneuse (3).





Si des bulles apparaissent, il y a une fuite. Fermer la vanne de sécurité et contacter le technicien biogaz

• **Filtre à soufre**

La paille de fer à l'intérieur du tuyau doit être changée tous les 6 mois. Le changement se fait après l'utilisation du gaz pour le changer :

- Fermer la vanne principale
- Desserrer les colliers qui assemblent le filtre à soufre au tuyau PPR 20
- Enlever les pailles de fer à l'intérieur du tuyau et les remplacer avec des pailles de fer neuves
- Replacer le filtre à soufre et serrer les colliers
- Ouvrir la vanne principale
- Vérifier si il n'y a aucune fuite au niveau du filtre à soufre avec de l'eau savonneuse

4/5

• **Fuite de biogaz**

Si la pression du biogaz est anormalement faible : pression en dessous de 6 KPa (1) ou flamme faible (2), il faut vérifier la présence potentielle de fuite sur certains endroits critiques de l'installation, au niveau des vannes et de la tuyauterie (raccords, coudes, T), à l'aide de l'eau savonneuse (3).

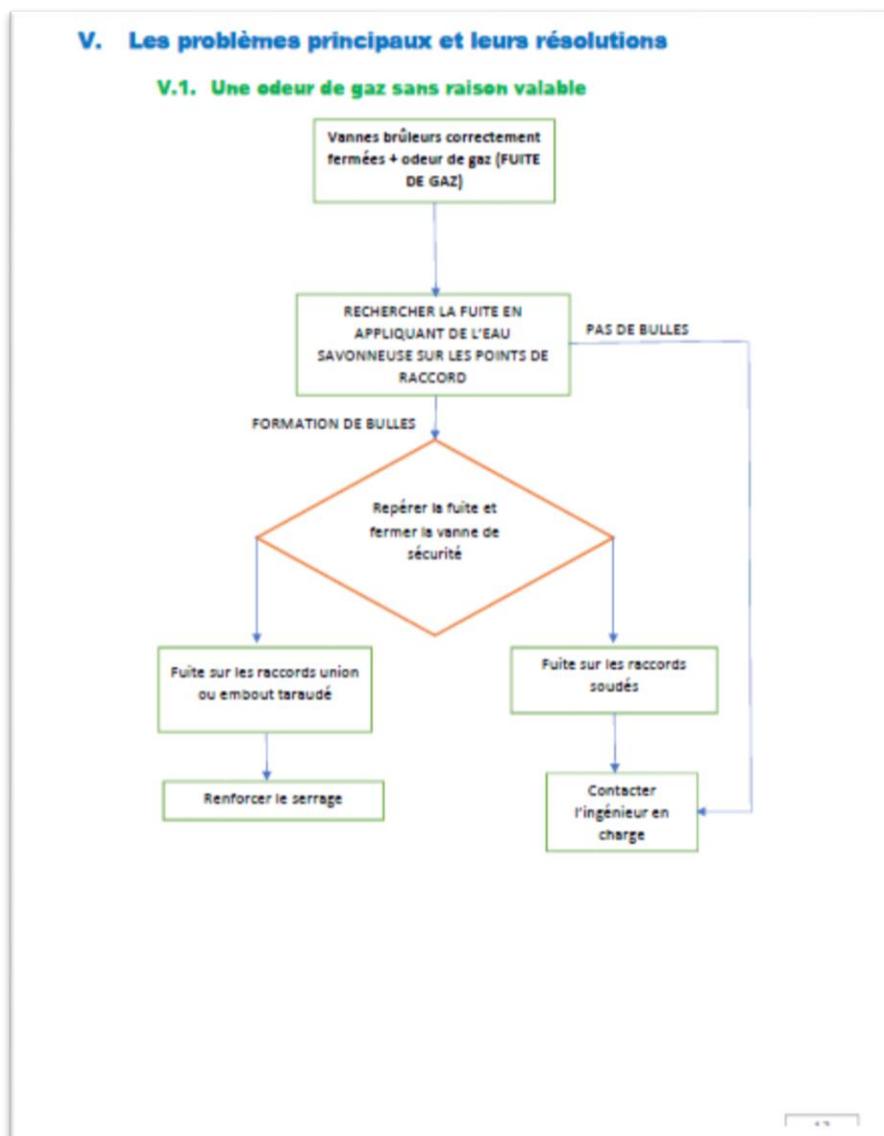
Si des bulles apparaissent, il y a une fuite. Fermer la vanne de sécurité et contacter le technicien biogaz

• **Filtre à soufre**

La paille de fer à l'intérieur du tuyau doit être changée tous les 6 mois. Le changement se fait après l'utilisation du gaz pour le changer :

- Fermer la vanne principale
- Desserrer les colliers qui assemblent le filtre à soufre au tuyau PPR 20
- Enlever les pailles de fer à l'intérieur du tuyau et les remplacer avec des pailles de fer neuves
- Replacer le filtre à soufre et serrer les colliers
- Ouvrir la vanne principale
- Vérifier si il n'y a aucune fuite au niveau du filtre à soufre avec de l'eau savonneuse

4/5



V.2. La flamme ne s'allume pas sur les brûleurs

Vérifier la pression du gaz sur le manomètre si (1) ou (2)



1



2

❖ Vérifier que la vanne principale et la vanne de dépannage sont ouvertes :

- Si fermées : les ouvrir et attendre la montée du gaz puis essayer à nouveau
- Si ouvertes : Il y a fuite, se référer à la partie V.1

S'il n'y a pas fuite, il n'y a pas de gaz dans le digesteur. Dans ce cas de figure, contacter l'ingénieur en charge.

❖ Vérifier que la vanne de sécurité et la vanne du brûleur sont ouvertes :

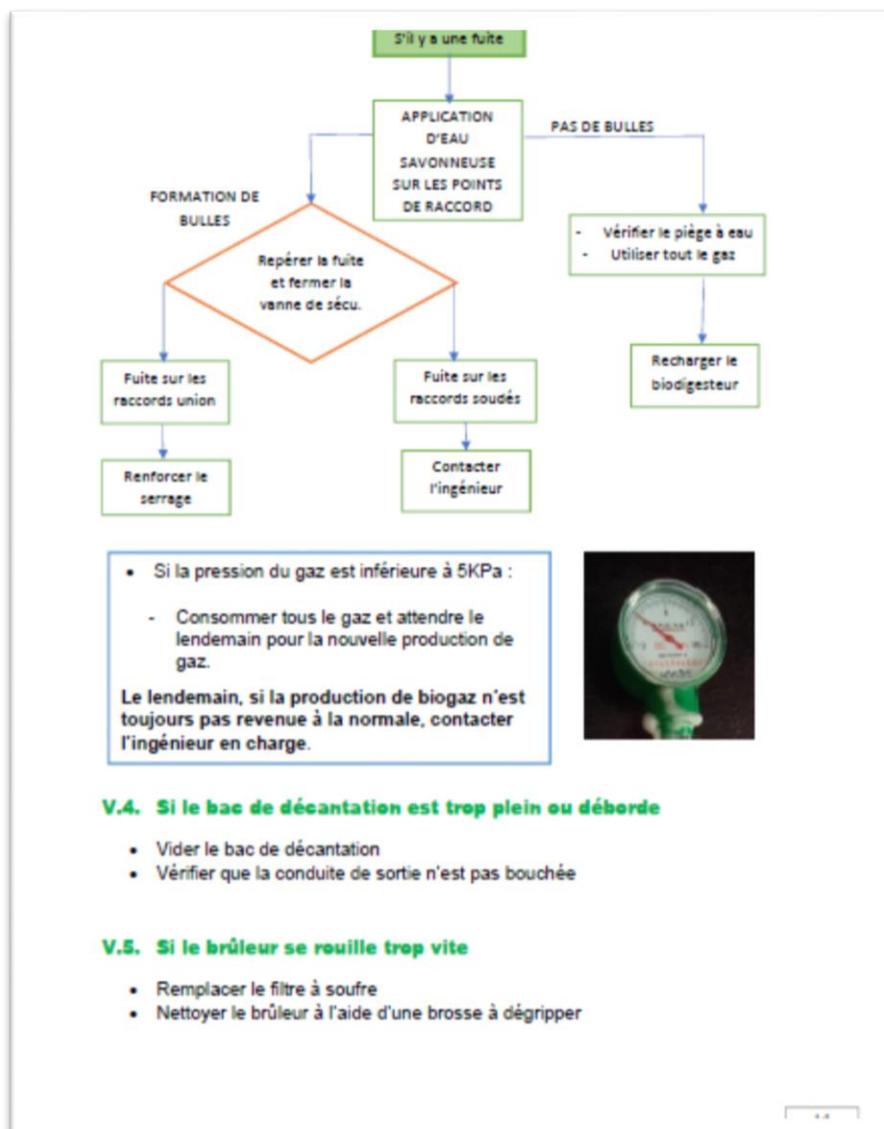
- Si fermées : les ouvrir et allumer le feu du brûleur
- Si ouvertes et ne s'allume pas encore :
 - Vérifier le piège à eau et la présence d'eau dans le circuit
 - Défaillance du brûleur, contacter l'ingénieur en charge.

V.3. La production de biogaz est faible, la flamme est rouge ou jaune

Vérifier que :

- La pression du gaz est supérieure à 5KPa
- Il n'y a pas de fuite de biogaz au niveau de la tuyauterie
- Il n'y a pas d'eau dans la conduite





V.4. Si le bac de décantation est trop plein ou déborde

- Vider le bac de décantation
- Vérifier que la conduite de sortie n'est pas bouchée

V.5. Si le brûleur se rouille trop vite

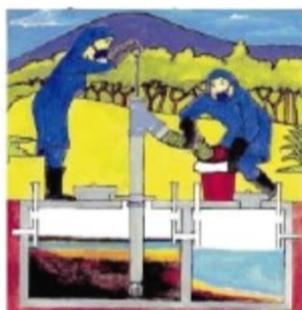
- Remplacer le filtre à soufre
- Nettoyer le brûleur à l'aide d'une brosse à dégripper

VI. Mode d'utilisation de la pompe d'aspiration

La pompe Gulper est utilisée pour enlever les sables et boues déposés au fond du bassin de compensation sans vider complètement le digesteur. La fréquence d'enlèvement de ces sables et ces dépôts est normalement annuelle.

Ci-dessus les étapes pour cette procédure :

- Soulever la trappe sur le bassin de compensation
- Plonger le tuyau d'aspiration de la pompe comme indiqué sur la photo ci-après
- Placer un seau pour récupérer les sables ou boues aspirés à la sortie de la pompe
- Pomper (manuellement)
- Enfouir les dépôts récupérés dans un lieu non inondable et à plus de 30m de tout puits ou lieu de pompage d'eau



NB : Ne pas oublier les équipements de protection comme les combinaisons, les bottes, les masques et les gants.

4/4

A2 Relevé de production de Biogaz à la MF de Tsiafahy du 04 Septembre 2019 au 30 mars 2019 (Source : CICR / AP)

Production de BIOGAZ à la MF de Tsiafahy

| Date | Heure | | Chiffre au compteur | | Quantité de biogaz | Durée d'utilisation |
|--|----------|----------|---------------------|---------|--------------------|---------------------|
| | Debut | Fin | Initial | Final | | |
| 04/09/2018 | 07:15:12 | 13:10:00 | 594 409 | 598 960 | 4 551 | 05:54:48 |
| 05/09/2018 | 07:20:11 | 11:36:35 | 598 962 | 602 251 | 3 289 | 04:16:24 |
| 06/09/2018 | 07:40:12 | 12:25:22 | 602 253 | 605 911 | 3 658 | 04:45:10 |
| 07/09/2018 | 07:33:12 | 13:23:00 | 605 913 | 610 400 | 4 487 | 05:49:48 |
| 08/09/2018 | 07:15:11 | 10:52:22 | 610 402 | 613 188 | 2 786 | 03:37:11 |
| 09/09/2018 | 07:50:00 | 11:01:37 | 613 190 | 615 648 | 2 458 | 03:11:37 |
| 10/09/2018 | 08:10:00 | 11:34:15 | 615 650 | 618 270 | 2 620 | 03:24:15 |
| 11/09/2018 | 07:50:11 | 12:44:57 | 618 272 | 622 053 | 3 781 | 04:54:46 |
| 12/09/2018 | 08:10:09 | 11:41:11 | 622 055 | 624 762 | 2 707 | 03:31:02 |
| 13/09/2018 | 07:20:09 | 10:54:04 | 624 764 | 627 508 | 2 744 | 03:33:55 |
| 14/09/2018 | 07:50:09 | 10:01:58 | 627 510 | 629 201 | 1 691 | 02:11:49 |
| 15/09/2018 | 08:40:08 | 12:34:33 | 629 203 | 632 210 | 3 007 | 03:54:25 |
| 16/09/2018 | 07:20:08 | 10:05:05 | 632 212 | 634 328 | 2 116 | 02:44:57 |
| 17/09/2018 | 07:50:06 | 11:06:14 | 634 330 | 636 846 | 2 516 | 03:16:08 |
| 18/09/2018 | 09:15:10 | 13:04:55 | 636 848 | 639 795 | 2 947 | 03:49:45 |
| 19/09/2018 | 08:40:09 | 11:38:45 | 639 797 | 642 088 | 2 291 | 02:58:36 |
| 20/09/2018 | 09:35:13 | 15:39:31 | 642 090 | 646 763 | 4 673 | 06:04:18 |
| 21/09/2018 | 08:20:12 | 12:37:42 | 646 765 | 650 068 | 3 303 | 04:17:30 |
| 22/09/2018 | 07:10:10 | 12:08:22 | 650 070 | 653 895 | 3 825 | 04:58:12 |
| 23/09/2018 | 07:25:03 | 12:01:25 | 653 897 | 657 442 | 3 545 | 04:36:22 |
| 24/09/2018 | 08:40:50 | 13:41:45 | 657 444 | 661 304 | 3 860 | 05:00:55 |
| 25/09/2018 | 08:35:17 | 11:29:31 | 661 306 | 663 541 | 2 235 | 02:54:14 |
| 26/09/2018 | 08:10:12 | 12:25:31 | 663 543 | 666 818 | 3 275 | 04:15:19 |
| 27/09/2018 | 08:15:25 | 10:41:16 | 666 820 | 668 691 | 1 871 | 02:25:51 |
| 28/09/2018 | 08:15:05 | 10:35:01 | 668 693 | 670 488 | 1 795 | 02:19:56 |
| 29/09/2018 | 08:40:56 | 12:50:33 | 670 490 | 673 692 | 3 202 | 04:09:37 |
| 30/09/2018 | 06:50:23 | 10:46:31 | 673 694 | 676 723 | 3 029 | 03:56:08 |
| 31/09/2018 au 02/10/2018 panne mecanique | | | | | | |
| 03/10/2018 | 06:12:35 | 13:01:48 | 676 824 | 682 073 | 5 249 | 06:49:13 |
| 04/10/2018 | 06:05:12 | 09:37:52 | 682 075 | 684 803 | 2 728 | 03:32:40 |
| 05/10/2018 | 08:50:08 | 11:07:39 | 684 805 | 686 569 | 1 764 | 02:17:31 |
| 06/10/2018 | 08:05:03 | 09:37:44 | 686 571 | 687 760 | 1 189 | 01:32:41 |
| 07/10/2018 | 07:15:11 | 11:56:56 | 687 762 | 691 376 | 3 614 | 04:41:45 |
| 08/10/2018 | 08:45:10 | 14:25:37 | 691 378 | 695 745 | 4 367 | 05:40:27 |
| 09/10/2018 | 07:10:11 | 11:01:52 | 695 747 | 698 719 | 2 972 | 03:51:41 |
| 10/10/2018 | 08:40:11 | 13:30:07 | 698 721 | 702 440 | 3 719 | 04:49:56 |
| 11/10/2018 | 07:45:15 | 13:00:12 | 702 442 | 706 482 | 4 040 | 05:14:57 |
| 12/10/2018 | 09:23:12 | 13:06:10 | 706 484 | 709 344 | 2 860 | 03:42:58 |
| 13/10/2018 | 07:20:12 | 10:46:29 | 709 346 | 711 992 | 2 646 | 03:26:17 |
| 14/10/2018 | 08:05:13 | 11:16:50 | 711 994 | 714 452 | 2 458 | 03:11:37 |
| 15/10/2018 | 08:14:58 | 11:56:50 | 714 454 | 717 300 | 2 846 | 03:41:52 |

| 16/10/2018 | 07:15:52 | 10:47:03 | 717 302 | 720 011 | 2 709 | 03:31:11 |
|------------|----------|----------|---------------------|---------|--------------------|---------------------|
| Date | Heure | | Chiffre au compteur | | Quantité de biogaz | Durée d'utilisation |
| | Debut | Fin | Initial | Final | | |
| 17/10/2018 | 08:10:05 | 12:09:44 | 720 013 | 723 087 | 3 074 | 03:59:39 |
| 18/10/2018 | 09:45:01 | 12:33:10 | 723 089 | 725 246 | 2 157 | 02:48:09 |
| 19/10/2018 | 08:42:15 | 11:46:09 | 725 248 | 727 607 | 2 359 | 03:03:54 |
| 20/10/2018 | 08:14:53 | 11:32:26 | 727 609 | 730 143 | 2 534 | 03:17:33 |
| 21/10/2018 | 08:25:26 | 11:34:29 | 730 145 | 732 570 | 2 425 | 03:09:03 |
| 22/10/2018 | 08:18:35 | 11:44:00 | 732 572 | 735 207 | 2 635 | 03:25:25 |
| 23/10/2018 | 08:12:03 | 11:00:26 | 735 209 | 737 369 | 2 160 | 02:48:23 |
| 24/10/2018 | 08:17:35 | 12:53:19 | 737 371 | 740 908 | 3 537 | 04:35:44 |
| 25/10/2018 | 08:23:14 | 12:47:31 | 740 910 | 744 300 | 3 390 | 04:24:17 |
| 26/10/2018 | 08:50:12 | 13:00:31 | 744 302 | 747 513 | 3 211 | 04:10:19 |
| 27/10/2018 | 08:35:14 | 13:01:56 | 747 515 | 750 936 | 3 421 | 04:26:42 |
| 28/10/2018 | 09:05:42 | 13:25:32 | 750 938 | 754 271 | 3 333 | 04:19:50 |
| 29/10/2018 | 07:53:02 | 11:44:39 | 754 273 | 757 244 | 2 971 | 03:51:37 |
| 30/10/2018 | 07:25:06 | 11:17:44 | 757 246 | 760 230 | 2 984 | 03:52:38 |
| 31/10/2018 | 07:32:14 | 11:19:10 | 760 232 | 763 143 | 2 911 | 03:46:56 |
| 01/11/2018 | 08:16:31 | 12:27:42 | 763 145 | 766 367 | 3 222 | 04:11:11 |
| 02/11/2018 | 07:49:32 | 12:03:22 | 766 369 | 769 625 | 3 256 | 04:13:50 |
| 03/11/2018 | 08:32:15 | 12:34:14 | 769 627 | 772 731 | 3 104 | 04:01:59 |
| 04/11/2018 | 08:15:06 | 12:15:55 | 772 733 | 775 822 | 3 089 | 04:00:49 |
| 05/11/2018 | 08:26:03 | 12:43:23 | 775 824 | 779 125 | 3 301 | 04:17:20 |
| 06/11/2018 | 07:56:04 | 12:02:20 | 779 127 | 782 286 | 3 159 | 04:06:16 |
| 07/11/2018 | 08:22:45 | 12:29:34 | 782 288 | 785 454 | 3 166 | 04:06:49 |
| 08/11/2018 | 08:13:06 | 12:21:00 | 785 456 | 788 636 | 3 180 | 04:07:54 |
| 09/11/2018 | 08:24:13 | 12:58:47 | 788 638 | 792 160 | 3 522 | 04:34:34 |
| 10/11/2018 | 08:13:42 | 12:08:40 | 792 162 | 795 176 | 3 014 | 03:54:58 |
| 11/11/2018 | 08:49:26 | 12:37:00 | 795 178 | 798 097 | 2 919 | 03:47:34 |
| 12/11/2018 | 07:36:41 | 11:31:44 | 798 099 | 801 114 | 3 015 | 03:55:03 |
| 13/11/2018 | 07:23:56 | 11:15:52 | 801 116 | 804 091 | 2 975 | 03:51:56 |
| 14/11/2018 | 08:01:57 | 11:54:25 | 804 093 | 807 075 | 2 982 | 03:52:28 |
| 15/11/2018 | 07:56:14 | 11:49:34 | 807 077 | 810 070 | 2 993 | 03:53:20 |
| 16/11/2018 | 08:09:03 | 11:57:56 | 810 072 | 813 008 | 2 936 | 03:48:53 |
| 17/11/2018 | 08:16:25 | 12:01:01 | 813 010 | 815 891 | 2 881 | 03:44:36 |
| 18/11/2018 | 08:46:12 | 12:44:59 | 815 893 | 818 956 | 3 063 | 03:58:47 |
| 19/11/2018 | 08:54:15 | 12:03:37 | 818 958 | 821 387 | 2 429 | 03:09:22 |
| 20/11/2018 | 08:45:36 | 12:21:00 | 821 389 | 824 152 | 2 763 | 03:35:24 |
| 21/11/2018 | 08:12:47 | 11:24:57 | 824 154 | 826 619 | 2 465 | 03:12:10 |
| 22/11/2018 | 08:52:31 | 12:17:33 | 826 621 | 829 251 | 2 630 | 03:25:02 |
| 23/11/2018 | 08:32:14 | 11:41:59 | 829 253 | 831 687 | 2 434 | 03:09:45 |
| 24/11/2018 | 08:55:09 | 13:01:58 | 831 689 | 834 855 | 3 166 | 04:06:49 |
| 25/11/2018 | 08:36:45 | 12:42:24 | 834 857 | 838 008 | 3 151 | 04:05:39 |
| 26/11/2018 | 08:56:02 | 11:58:37 | 838 010 | 840 352 | 2 342 | 03:02:35 |
| 27/11/2018 | 08:32:06 | 12:11:24 | 840 354 | 843 167 | 2 813 | 03:39:18 |
| 28/11/2018 | 08:12:36 | 12:11:04 | 843 169 | 846 228 | 3 059 | 03:58:28 |
| 29/11/2018 | 08:09:15 | 12:22:56 | 846 230 | 849 484 | 3 254 | 04:13:41 |

| Date | Heure | | Chiffre au compteur | | Quantité de biogaz | Durée d'utilisation |
|------------|----------|----------|---------------------|---------|--------------------|---------------------|
| | Debut | Fin | Initial | Final | | |
| 30/11/2018 | 08:45:07 | 12:51:51 | 849 486 | 852 651 | 3 165 | 04:06:44 |
| 01/12/2018 | 08:12:06 | 12:19:42 | 852 653 | 855 829 | 3 176 | 04:07:36 |
| 02/12/2018 | 08:39:56 | 13:35:52 | 855 831 | 859 627 | 3 796 | 04:55:56 |
| 03/12/2018 | 08:25:04 | 13:28:52 | 859 629 | 863 526 | 3 897 | 05:03:48 |
| 04/12/2018 | 08:14:06 | 12:20:13 | 863 528 | 866 685 | 3 157 | 04:06:07 |
| 05/12/2018 | 08:21:53 | 13:05:53 | 866 687 | 870 330 | 3 643 | 04:44:00 |
| 06/12/2018 | 08:45:12 | 12:41:15 | 870 332 | 873 360 | 3 028 | 03:56:03 |
| 07/12/2018 | 08:53:45 | 12:13:57 | 873 362 | 875 930 | 2 568 | 03:20:12 |
| 08/12/2018 | 08:31:47 | 11:30:00 | 875 932 | 878 218 | 2 286 | 02:58:13 |
| 09/12/2018 | 08:42:35 | 12:29:22 | 878 220 | 881 129 | 2 909 | 03:46:47 |
| 10/12/2018 | 08:37:06 | 12:24:16 | 881 131 | 884 045 | 2 914 | 03:47:10 |
| 11/12/2018 | 08:34:25 | 11:30:08 | 884 047 | 886 301 | 2 254 | 02:55:43 |
| 12/12/2018 | 08:07:52 | 10:52:03 | 886 303 | 888 409 | 2 106 | 02:44:11 |
| 13/12/2018 | 08:11:26 | 11:44:53 | 888 411 | 891 149 | 2 738 | 03:33:27 |
| 14/12/2018 | 08:49:25 | 11:44:02 | 891 151 | 893 391 | 2 240 | 02:54:37 |
| 15/12/2018 | 08:36:42 | 11:51:31 | 893 393 | 895 892 | 2 499 | 03:14:49 |
| 16/12/2018 | 07:45:38 | 10:39:57 | 895 894 | 898 130 | 2 236 | 02:54:19 |
| 17/12/2018 | 07:56:48 | 10:43:14 | 898 132 | 900 267 | 2 135 | 02:46:26 |
| 18/12/2018 | 08:05:03 | 10:44:33 | 900 269 | 902 315 | 2 046 | 02:39:30 |
| 19/12/2018 | 08:19:59 | 11:07:26 | 902 317 | 904 465 | 2 148 | 02:47:27 |
| 20/12/2018 | 08:53:06 | 12:38:38 | 904 467 | 907 360 | 2 893 | 03:45:32 |
| 21/12/2018 | 08:26:27 | 12:03:10 | 907 362 | 910 142 | 2 780 | 03:36:43 |
| 22/12/2018 | 08:37:52 | 11:50:07 | 910 144 | 912 610 | 2 466 | 03:12:15 |
| 23/12/2018 | 07:38:41 | 10:27:46 | 912 612 | 914 781 | 2 169 | 02:49:05 |
| 24/12/2018 | 07:23:19 | 10:37:21 | 914 783 | 917 272 | 2 489 | 03:14:02 |
| 25/12/2018 | 07:53:16 | 10:41:49 | 917 274 | 919 436 | 2 162 | 02:48:33 |
| 26/12/2018 | 08:14:06 | 11:20:48 | 919 438 | 921 833 | 2 395 | 03:06:42 |
| 27/12/2018 | 08:05:34 | 11:30:12 | 921 835 | 924 460 | 2 625 | 03:24:38 |
| 28/12/2018 | 08:48:12 | 12:31:52 | 924 462 | 927 331 | 2 869 | 03:43:40 |
| 29/12/2018 | 08:36:05 | 12:55:18 | 927 333 | 930 658 | 3 325 | 04:19:13 |
| 30/12/2018 | 08:02:04 | 12:11:23 | 930 660 | 933 858 | 3 198 | 04:09:19 |
| 31/12/2018 | 08:24:37 | 12:37:03 | 933 860 | 937 098 | 3 238 | 04:12:26 |
| 01/01/2019 | 08:10:52 | 13:20:12 | 937 100 | 941 068 | 3 968 | 05:09:20 |
| 02/01/2019 | 08:59:03 | 14:11:49 | 941 070 | 945 082 | 4 012 | 05:12:46 |
| 03/01/2019 | 08:47:24 | 13:32:34 | 945 084 | 948 742 | 3 658 | 04:45:10 |
| 04/01/2019 | 07:35:14 | 12:13:28 | 948 744 | 952 313 | 3 569 | 04:38:14 |
| 05/01/2019 | 07:49:06 | 12:42:23 | 952 315 | 956 077 | 3 762 | 04:53:17 |
| 06/01/2019 | 07:15:42 | 12:24:44 | 956 079 | 960 043 | 3 964 | 05:09:02 |
| 07/01/2019 | 08:19:24 | 12:49:36 | 960 045 | 963 511 | 3 466 | 04:30:12 |
| 08/01/2019 | 07:52:31 | 12:46:21 | 963 513 | 967 282 | 3 769 | 04:53:50 |
| 09/01/2019 | 07:35:41 | 12:13:46 | 967 284 | 970 851 | 3 567 | 04:38:05 |
| 10/01/2019 | 07:06:41 | 12:15:43 | 970 853 | 974 817 | 3 964 | 05:09:02 |
| 11/01/2019 | 07:29:36 | 11:59:30 | 974 819 | 978 281 | 3 462 | 04:29:54 |
| 12/01/2019 | 08:46:29 | 13:05:28 | 978 283 | 981 605 | 3 322 | 04:18:59 |
| Date | Heure | | Chiffre au compteur | | | |

| | Debut | Fin | Initial | Final | Quantité de biogaz | Durée d'utilisation |
|------------|----------|----------|---------------------|-----------|--------------------|---------------------|
| 13/01/2019 | 08:32:14 | 13:28:33 | 981 607 | 985 408 | 3 801 | 04:56:19 |
| 14/01/2019 | 08:15:24 | 13:19:31 | 985 410 | 989 311 | 3 901 | 05:04:07 |
| 15/01/2019 | 07:51:02 | 12:28:39 | 989 313 | 992 874 | 3 561 | 04:37:37 |
| 16/01/2019 | 08:03:47 | 13:04:56 | 992 876 | 996 739 | 3 863 | 05:01:09 |
| 17/01/2019 | 08:52:37 | 14:06:15 | 996 741 | 1 000 764 | 4 023 | 05:13:38 |
| 18/01/2019 | 08:25:49 | 13:31:48 | 1 000 766 | 1 004 691 | 3 925 | 05:05:59 |
| 19/01/2019 | 08:05:07 | 12:58:38 | 1 004 693 | 1 008 458 | 3 765 | 04:53:31 |
| 20/01/2019 | 07:48:06 | 12:35:41 | 1 008 460 | 1 012 149 | 3 689 | 04:47:35 |
| 21/01/2019 | 07:29:03 | 12:32:47 | 1 012 151 | 1 016 047 | 3 896 | 05:03:44 |
| 22/01/2019 | 08:35:04 | 13:43:14 | 1 016 049 | 1 020 002 | 3 953 | 05:08:10 |
| 23/01/2019 | 08:24:00 | 13:21:29 | 1 020 004 | 1 023 820 | 3 816 | 04:57:29 |
| 24/01/2019 | 08:37:21 | 13:01:33 | 1 023 822 | 1 027 211 | 3 389 | 04:24:12 |
| 25/01/2019 | 08:34:52 | 11:11:20 | 1 027 213 | 1 029 220 | 2 007 | 02:36:28 |
| 26/01/2019 | 08:46:55 | 09:56:08 | 1 029 222 | 1 030 110 | 888 | 01:09:13 |
| 27/01/2019 | 08:02:39 | 09:30:40 | 1 030 112 | 1 031 241 | 1 129 | 01:28:01 |
| 28/01/2019 | 08:42:00 | 10:59:54 | 1 031 243 | 1 033 012 | 1 769 | 02:17:54 |
| 29/01/2019 | 08:35:22 | 10:08:50 | 1 033 014 | 1 034 213 | 1 199 | 01:33:28 |
| 30/01/2019 | 08:32:49 | 09:51:10 | 1 034 215 | 1 035 220 | 1 005 | 01:18:21 |
| 31/01/2019 | 07:53:14 | 10:43:25 | 1 035 222 | 1 037 405 | 2 183 | 02:50:11 |
| 01/02/2019 | 07:46:13 | 10:07:38 | 1 037 407 | 1 039 221 | 1 814 | 02:21:25 |
| 02/02/2019 | 08:01:06 | 09:10:15 | 1 039 223 | 1 040 110 | 887 | 01:09:09 |
| 03/02/2019 | 08:13:45 | 09:02:00 | 1 040 112 | 1 040 731 | 619 | 00:48:15 |
| 04/02/2019 | 07:53:25 | 08:06:49 | 1 040 733 | 1 040 905 | 172 | 00:13:24 |
| 05/02/2019 | 08:35:14 | 08:46:32 | 1 040 907 | 1 041 052 | 145 | 00:11:18 |
| 06/02/2019 | 08:17:36 | 09:40:04 | 1 041 054 | 1 042 112 | 1 058 | 01:22:28 |
| 07/02/2019 | 07:16:29 | 10:00:40 | 1 042 114 | 1 044 220 | 2 106 | 02:44:11 |
| 08/02/2019 | 08:34:18 | 09:13:54 | 1 044 222 | 1 044 730 | 508 | 00:39:36 |
| 09/02/2019 | 09:05:07 | 09:11:11 | 1 044 732 | 1 044 810 | 78 | 00:06:04 |
| 10/02/2019 | 08:52:34 | 09:06:31 | 1 044 812 | 1 044 991 | 179 | 00:13:57 |
| 11/02/2019 | 08:21:09 | 09:38:57 | 1 044 993 | 1 045 991 | 998 | 01:17:48 |
| 12/02/2019 | 08:35:28 | 11:06:33 | 1 045 993 | 1 047 931 | 1 938 | 02:31:05 |
| 13/02/2019 | 08:09:56 | 10:44:55 | 1 047 933 | 1 049 921 | 1 988 | 02:34:59 |
| 14/02/2019 | 08:12:57 | 12:11:39 | 1 049 923 | 1 052 985 | 3 062 | 03:58:42 |
| 15/02/2019 | 09:15:12 | 12:56:55 | 1 052 987 | 1 055 831 | 2 844 | 03:41:43 |
| 16/02/2019 | 08:15:12 | 11:56:13 | 1 055 833 | 1 058 668 | 2 835 | 03:41:01 |
| 17/02/2019 | 09:00:12 | 11:17:10 | 1 058 670 | 1 060 427 | 1 757 | 02:16:58 |
| 18/02/2019 | 07:30:30 | 10:48:07 | 1 060 429 | 1 062 964 | 2 535 | 03:17:37 |
| 19/02/2019 | 08:40:10 | 10:41:09 | 1 062 966 | 1 064 518 | 1 552 | 02:00:59 |
| 20/02/2019 | 08:40:10 | 09:59:27 | 1 064 520 | 1 065 537 | 1 017 | 01:19:17 |
| 21/02/2019 | 09:10:09 | 13:51:11 | 1 065 539 | 1 069 144 | 3 605 | 04:41:02 |
| 22/02/2019 | 07:50:05 | 11:13:57 | 1 069 146 | 1 071 761 | 2 615 | 03:23:52 |
| 23/02/2019 | 08:10:12 | 09:07:06 | 1 071 763 | 1 072 493 | 730 | 00:56:54 |
| 24/02/2019 | 09:00:13 | 10:05:18 | 1 072 495 | 1 073 330 | 835 | 01:05:05 |
| 25/02/2019 | 07:30:13 | 10:36:13 | 1 073 332 | 1 075 718 | 2 386 | 03:06:00 |
| Date | Heure | | Chiffre au compteur | | | |

| | Debut | Fin | Initial | Final | Quantité de biogaz | Durée d'utilisation |
|------------|----------|----------|-----------|-----------|--------------------|---------------------|
| 26/02/2019 | 09:30:12 | 12:46:58 | 1 075 720 | 1 078 244 | 2 524 | 03:16:46 |
| 27/02/2019 | 08:45:12 | 09:33:36 | 1 078 246 | 1 078 867 | 621 | 00:48:24 |
| 28/02/2019 | 07:00:12 | 07:31:37 | 1 078 869 | 1 079 272 | 403 | 00:31:25 |
| 01/03/2019 | 08:10:12 | 08:30:09 | 1 079 274 | 1 079 530 | 256 | 00:19:57 |
| 02/03/2019 | 07:30:12 | 07:37:17 | 1 079 532 | 1 079 623 | 91 | 00:07:05 |
| 03/03/2019 | 07:20:12 | 07:21:22 | 1 079 625 | 1 079 640 | 15 | 00:01:10 |
| 04/03/2019 | 08:30:12 | 08:31:26 | 1 079 642 | 1 079 658 | 16 | 00:01:14 |
| 05/03/2019 | arrêt | | | | | |
| 06/03/2019 | 08:40:12 | 10:28:33 | 1 079 660 | 1 081 050 | 1 390 | 01:48:21 |
| 07/03/2019 | 07:00:12 | 08:33:26 | 1 081 052 | 1 082 248 | 1 196 | 01:33:14 |
| 08/03/2019 | 08:15:11 | 10:01:12 | 1 082 250 | 1 083 610 | 1 360 | 01:46:01 |
| 09/03/2019 | 07:30:11 | 11:15:29 | 1 083 612 | 1 086 502 | 2 890 | 03:45:18 |
| 10/03/2019 | 07:10:11 | 09:12:48 | 1 086 504 | 1 088 077 | 1 573 | 02:02:37 |
| 11/03/2019 | 07:30:11 | 09:20:25 | 1 088 079 | 1 089 493 | 1 414 | 01:50:14 |
| 12/03/2019 | 08:00:11 | 09:56:44 | 1 089 495 | 1 090 990 | 1 495 | 01:56:33 |
| 13/03/2019 | 07:15:09 | 10:11:39 | 1 090 992 | 1 093 256 | 2 264 | 02:56:30 |
| 14/03/2019 | 08:00:12 | 11:47:46 | 1 093 258 | 1 096 177 | 2 919 | 03:47:34 |
| 15/03/2019 | 11:30:11 | 13:21:02 | 1 096 179 | 1 097 601 | 1 422 | 01:50:51 |
| 16/03/2019 | 08:45:31 | 10:29:59 | 1 097 603 | 1 098 943 | 1 340 | 01:44:28 |
| 17/03/2019 | 08:12:46 | 11:04:49 | 1 098 945 | 1 101 152 | 2 207 | 02:52:03 |
| 18/03/2019 | 09:32:57 | 10:58:51 | 1 101 154 | 1 102 256 | 1 102 | 01:25:54 |
| 19/03/2019 | 07:23:52 | 11:18:03 | 1 102 258 | 1 105 262 | 3 004 | 03:54:11 |
| 20/03/2019 | 06:53:14 | 09:33:49 | 1 105 264 | 1 107 324 | 2 060 | 02:40:35 |
| 21/03/2019 | 06:25:34 | 09:58:42 | 1 107 326 | 1 110 060 | 2 734 | 03:33:08 |
| 22/03/2019 | 06:47:03 | 10:41:38 | 1 110 062 | 1 113 071 | 3 009 | 03:54:35 |
| 23/03/2019 | 07:24:09 | 11:10:18 | 1 113 073 | 1 115 974 | 2 901 | 03:46:09 |
| 24/03/2019 | 07:49:32 | 10:45:20 | 1 115 976 | 1 118 231 | 2 255 | 02:55:48 |
| 25/03/2019 | 07:45:18 | 11:01:59 | 1 118 233 | 1 120 756 | 2 523 | 03:16:41 |
| 26/03/2019 | 07:53:14 | 11:56:04 | 1 120 758 | 1 123 873 | 3 115 | 04:02:50 |
| 27/03/2019 | 07:05:03 | 12:59:27 | 1 123 875 | 1 128 421 | 4 546 | 05:54:24 |
| 28/03/2019 | 07:35:42 | 09:43:19 | 1 128 423 | 1 130 060 | 1 637 | 02:07:37 |
| 29/03/2019 | 07:25:04 | 11:19:39 | 1 130 062 | 1 133 071 | 3 009 | 03:54:35 |
| 30/03/2019 | 07:15:36 | 10:58:24 | 1 133 073 | 1 135 931 | 2 858 | 03:42:48 |